



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FINAL DE CARRERA

TÍTOL: Efecte dels ultrasons en la adherència de les fibres de carboni en els aliatges AISi

AUTOR: Franco Gasca, Guillermo

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Industrial esp. Mecànica

DIRECTOR: Forn Alonso, Antoni

DEPARTAMENT: Ciència dels materials i enginyeria metal·lúrgica

DATA:

TÍTOL:

Efecte dels ultrasons en la adherència de les fibres de carboni en els aliatges AlSi

COGNOMS: Franco Gasca**NOM:** Guillermo**TITULACIÓ:** Enginyeria Tècnica Industrial**ESPECIALITAT:** Mecànica**PLA:** 95**DIRECTOR:** Forn Alonso, Antoni**DEPARTAMENT:** Ciència dels materials e enginyeria metal·lúrgica**QUALIFICACIÓ DEL PFC****TRIBUNAL****PRESIDENT**

JOSEP ANTON
PICAS BARRACHINA

SECRETARI

SERGI
MENARGUES MUÑOZ

VOCAL

JAUME MIQUEL
MASALLES

DATA DE LECTURA:

Aquest projecte té en compte aspectes mediambientals: ☐ Sí ☐ No

PROJECTE FINAL DE CARRERA

RESUM (màxim 50 línies)

En el present projecte s'estudiarà l'efecte dels ultrasons en la possible adherència d'aliatges Alumini-Silici en fibres de carboni.

Els aliatges d'Alumini-Silici mostren un gran potencial a la indústria aeronàutica i automobilística. S'utilitzen en aplicacions on es requereix una col·labilitat excel·lent, bona soldabilitat, hermeticitat i bona resistència a la corrosió: controls de motors, cilindres refrigerats amb aigua, instal·lacions d'energia nuclear i altres aplicacions on es necessiten motllos de permanent resistència mecànica.

Per altre banda, les fibres de carboni gaudeixen d'una elevada resistència mecànica, un mòdul d'elasticitat elevat, una baixa densitat en comparació amb altres elements com per exemple l'acer, una gran capacitat d'aïllament tèrmic i una resistència a les variacions de temperatura.

La combinació d'aquests dos elements pot tenir un gran èxit, per exemple, en la fabricació de cables de comunicació, on es substituirien els cables d'alta tensió per filaments de fibres de carboni reforçades amb aliatges d'alumini. Això provocaria un gran estalvi en el disseny i construcció de línies de comunicació. Amb una semblant resistència mecànica i una baixa densitat dels filaments reforçats es podrien construir menys torres i a més distància, reduint costos. Tot i que els feixos de fibres de carboni tenen un preu alt, l'aliatge AlSi és dels més comuns i econòmics al mercat, així com ho seria el mètode utilitzat, els ultrasons.

El mètode de la impregnació per ultrasons és un dels més simples metòdicament i econòmicament. També és, alhora, el que millor resultat ha tingut en els estudis d'impregnació de fibres de carboni, davant altres mètodes com la infiltració per pressió. Processos experimentals sobre aquest tema s'estan realitzant en els darrers anys, d'una manera cada cop més expandida, al Japó, on enginyers especialitzats en sistemes mecànics i disseny d'aliatges redacten articles des del 1992. Un dels més propers és en Tadashi Matsunga [12] que ha publicat articles on redacta que s'ha aconseguit la impregnació de les fibres i les variables que milloren aquesta.

S'hauran d'analitzar les propietats de l'aliatge de treball, així com la metodologia per aconseguir la impregnació del feix de fibres.

Conèixer els principis teòrics de la inducció i de l'escalfament per inducció i la metodologia d'aplicació d'ultrasons, serà indispensable per assolir l'objectiu principal d'aquest projecte. Tot això farà possible l'engegada del forn i la possibilitat de determinar les condicions de treball dels assajos.

Per investigar les condicions òptimes de fabricació es tractaran diferents variables que ens ofereix el forn d'inducció, com són el control de la temperatura i la velocitat de fusió de l'aliatge al llarg del procés experimental i, l'aparell d'ultrasons. Aquí és on podrem treballar amb més quantitat d'opcions com són: la freqüència dels ultrasons, l'amplitud d'ona, la potència, el temps d'aplicació o el diàmetre del sonotrode.

Paraules clau (màxim 10)

Fibra de carboni	Aliatge	Ultrasons	Forn d'inducció
Assaig	Proveta	Alumini	A356.0

**PROPOSTA DE PROJECTE FINAL DE CARRERA**

Pàg: 1/2

GUILLERMO FRANCO GASCA -DNI: 47836986 - Telèfon: 938150464
ENGINYERIA TÈCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALITAT DE MECÀNICA - 340ETIM95

18/4/2012
Signatura

Projecte proposat per:

- ☒ **1 Departament:**
702, CIÈNCIA DELS MATERIALS I ENGINYERIA METAL·LÚRGICA

Projecte**▶ Títol del projecte**

Efecto de los ultrasonidos en la adherencia de las fibras de carbono a las aleaciones AlSi

▶ Estudiant/a

GUILLERMO FRANCO GASCA

▶ Director/a del projecte

Antoni Forn Alonso

Signatura del director

▶ Professor/a Ponent (en el cas de projectes realitzats en una empresa)

Signatura del ponent

▶ Vist i Plau Cap de secció departament (per a tots els tipus de propostes)

Departament: 702, CIÈNCIA DELS MATERIALS I ENGINYERIA METAL·LÚRGICA
Cap de secció: JOSEP ANTON PICAS BARRACHINA

Signatura del cap de secció

DATA I SIGNATURA APROVACIÓ COMISSIÓ COORDINACIÓ DOCENT

Copia per Sots-direcció Acadèmica



PROPOSTA DE PROJECTE FINAL DE CARRERA

Pàg: 2/2

GUILLERMO FRANCO GASCA -DNI: 47836986 - Telèfon: 938150464
ENGINYERIA TÈCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALITAT DE MECÀNICA - 340ETIM 95

Objectius / Programació / Recursos

► Objectius a assolir

El principal objectiu que es pretén assolir amb la realització d'aquest projecte és la impregnació de fibres de carboni amb un aliatge Alumini-Silici mitjançant el mètode dels ultrasons. Posteriorment es farà un estudi dels efectes de cada un dels paràmetres que influeix en la facilitat d'infiltració de l'alumini en el feix de fibres.

► Descripció i Programació temporal del treball a realitzar

Amb el propòsit de fabricar fibres de carboni reforçades amb aliatges d'alumini, s'han desenvolupat diversos mètodes com la infiltració per pressió i la infiltració per ultrasons. Entre aquests mètodes, la impregnació mitjançant ultrasons és la més simple metòdicament i econòmicament. En aquest estudi s'investigaran paràmetres com: - La influència de la potència dels ultrasons - La influència del diàmetre del sonotrode - La influència de la velocitat de fabricació - La influència del contingut de Magnesi - La influència de la freqüència i amplitud dels ultrasons El primer pas, i el que més ens orientarà en el mètode de realització de les proves, és l'estudi de la bibliografia existent tant en llibres de materials com en revistes d'investigació, on es publiquen els estudis més recents sobre el propi tema. El següent pas és crear una metodologia de treball on es realitzaran les diferents proves amb l'aparell d'ultrasons i, finalment, l'estudi dels diferents paràmetres abans comentats en la impregnació del feix de fibres amb l'aliatge d'alumini. Si el percentatge d'impregnació de les fibres és elevat, es realitzaran proves d'esforços per estudiar les propietats mecàniques del material reforçat.

► Recursos del Centre

La part pràctica del projecte es realitzarà en el Centre Tecnològic de la UPC de Vilanova i la Geltrú on es disposa d'un forn d'inducció i d'un aparell emissor d'ultrasons. A part de la infraestructura del centre també s'obtindrà informació de llibres i publicacions que es troben a la Biblioteca de la UPC de Vilanova.

Índex de continguts

1. Glossari.....	6
2. Introducció	7
2.1. Objectius.....	7
2.2. Justificació del projecte	7
3. Resum	8
4. Estat de la tècnica	10
4.1. Fabricació continua d'un aliatge d'Alumini-Magnesi reforçat amb fibra utilitzant el mètode de la infiltració per ultrasons	10
4.2. Efecte de la cavitació acústica en la infiltració d'aliatges d'alumini fos en fibres de carboni utilitzant el mètode d'infiltració per ultrasons.	15
Figura 4.10: Influència del contingut de Mg [13].....	17
5. Equipament i material	18
5.1. Aliatges d'alumini A356.0 i A357.0.....	18
5.2. Fibra de carboni (FC).....	19
5.3. Productes per al poliment i reactius químics d'atac de la proveta.....	20
5.4. Forn d'inducció.....	21
5.5. Aparell d'ultrasons.....	22
6. Mètode experimental	23
6.1. Mètodes d'introducció de les fibres de carboni en el grisol d'alumini fos	23
6.1.1. Mètode 1.....	23
6.1.2. Mètode 2.....	23
6.2. Escalfament per inducció amb aplicació d'ultrasons	24
6.3. Refredament de les provetes	27
6.4. Nomenclatura de les provetes	27
6.5. Preparació de la metal·lografia.....	28
7. Resultats experimentals	31
7.1. Assajos previs: Estudi dels paràmetres en l'escalfament	31
7.1.1. Estudi del voltatge	31
7.2. Esquema dels assajos realitzats.....	32
7.3. Assajos sense aplicació d'ultrasons, utilitzant recobriments de Coure	33
7.3.1. Assaig M1, M2, M3 i M4.....	33

7.4. Assajos amb aplicació d'ultrasons	35
7.4.1. Assaig M5	35
7.4.2. Assaig M6	37
7.4.3. Assaig M7	38
7.4.4. Assaig M8	43
7.4.5. Assaig M9	46
8. Anàlisi dels resultats	48
8.1. Influència de la temperatura de l'assaig	48
8.1.1. Influència en la microestructura de l'aliatge	48
8.1.2. Influència en la impregnació de l'aliatge en les mines de grafit	49
8.1.3. Influència en la impregnació de l'aliatge en les fibres de carboni	50
8.2. Influència de l'amplitud i la potència d'ona dels ultrasons	51
8.2.1. Influència en la microestructura de l'aliatge	51
8.2.2. Influència en la impregnació de l'aliatge en les mines de grafit	52
8.2.3. Influència en la impregnació de l'aliatge en les fibres de carboni	53
8.3. Influència del temps d'aplicació dels ultrasons en els assajos	54
9. Conclusions	55
10. Perspectives	56
11. Pressupost	57
12. Gestió ambiental	59
13. Agraïments	60
14. Bibliografia	61
15. Índex de figures i taules	62

1. Glossari

FEM: Força electromotriu

CDAL: Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfícies

SLC: Sub Liquidus Casting

NRC: New Rheocasting

SIMA: Strain Induced Melt Activated

SSTT: Semi-solid Thermal Transformation

2. Introducció

2.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és la impregnació de fibres de carboni en els aliatges d'alumini A356.0 i A357.0 mitjançant la fusió total i l'aplicació d'ultrasons. L'escalfament es realitzarà en un forn d'inducció d'alta freqüència on, alhora, s'aplicaran els ultrasons.

Per assolir l'objectiu del projecte s'haurà d'analitzar, en primer lloc, les propietats de l'aliatge de treball, així com la metodologia per aconseguir la impregnació del feix de fibres.

S'hauran de conèixer, per una banda, els principis teòrics de la inducció i de l'escalfament per inducció i, per un altre, la metodologia d'aplicació d'ultrasons. Tot això farà possible l'engegada del forn i la possibilitat de determinar les condicions de treball dels assajos.

Finalment, serà essencial saber utilitzar els equips de laboratori per poder realitzar la preparació de les provetes per l'anàlisi.

2.2. Justificació del projecte

El present projecte no es realitza per demanda, o a partir del coneixement de cap centre especialitzat o empresa privada, sinó per pròpia iniciativa del CDAL (Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfícies).

3. Resum

En el present projecte s'estudiarà l'efecte dels ultrasons en la possible adherència d'aliatges Alumini-Silici en fibres de carboni.

Els aliatges Alumini-Silici mostren un gran potencial a la indústria aeronàutica i automobilística. S'utilitzen en aplicacions on es requereix una col·labilitat excel·lent, bona soldabilitat, hermeticitat i bona resistència a la corrosió: controls de motors, cilindres refrigerats amb aigua, instal·lacions d'energia nuclear i altres aplicacions on es necessiten motllos de permanent resistència mecànica.

Per altre banda, les fibres de carboni gaudeixen d'una elevada resistència mecànica, un mòdul d'elasticitat elevat, una baixa densitat en comparació amb altres elements com per exemple l'acer, una gran capacitat d'aïllament tèrmic i una resistència a les variacions de temperatura.

La combinació d'aquests dos elements pot tenir un gran èxit, per exemple, en la fabricació de cables de comunicació, on es podrien substituir els cables d'alta tensió per filaments de fibres de carboni reforçades amb aliatges d'alumini. Això provocaria un gran estalvi en el disseny i construcció de línies de comunicació. Amb una semblant resistència mecànica i una baixa densitat dels filaments reforçats, es podrien construir menys torres i a més distància, reduint costos. Tot i que els feixos de fibres de carboni tenen un preu relativament alt, l'aliatge AlSi és un dels més comuns i econòmics al mercat, així com ho seria el mètode utilitzat, els ultrasons.

El mètode de la impregnació per ultrasons a més de ser un mètode econòmic la metodologia a seguir no és gaire complexa. També és, alhora, el que millor resultat ha tingut en els estudis d'impregnació de fibres de carboni, davant altres mètodes com la infiltració per pressió. Processos experimentals sobre aquest tema s'estan realitzant en els darrers anys, d'una manera cada cop més expandida, al Japó, on enginyers especialitzats en sistemes mecànics i disseny d'aliatges redacten articles des del 1992. Un dels més propers és en Tadashi Matsunga [12] que ha publicat articles on documenta que s'ha aconseguit la impregnació de les fibres, i les variables que milloren aquesta.

S'hauran d'analitzar les propietats de l'aliatge de treball, així com la metodologia per aconseguir la impregnació del feix de fibres.

Conèixer els principis teòrics de la inducció i de l'escalfament per inducció i la metodologia d'aplicació d'ultrasons, serà indispensable per assolir l'objectiu principal d'aquest projecte. Tot això farà possible l'engegada del forn i la possibilitat de determinar les condicions de treball dels assajos.

Per investigar les condicions òptimes de fabricació es tractaran diferents variables que ens ofereix el forn d'inducció, com són el control de la temperatura i la velocitat de fusió de l'aliatge al llarg del procés experimental, i l'aparell d'ultrasons. Aquí és on podrem treballar amb més quantitat d'opcions com són: la freqüència dels ultrasons, l'amplitud d'ona, la potència, el temps d'aplicació o el diàmetre del sonotrode.

Finalment, serà essencial saber utilitzar els equips de laboratori per poder realitzar la preparació de les provetes per l'anàlisi.

4. Estat de la tècnica

Abans de començar a experimentar i documentar processos i assajos s'ha investigat sobre la bibliografia que existia fins el moment.

En aquest apartat del projecte es mencionaran articles relacionats la infiltració d'aliatges d'alumini en fibres de carboni. Es debateran els aspectes comuns i les diferències amb el procés que es seguirà i els materials s'empraran al llarg de l'experimentació al CDAL.

Els punts en comú en que més s'ha de prestar atenció en aquests articles són:

- La utilització d'un forn d'inducció d'alta freqüència, que pot treballar a altes temperatures.
- L'aplicació d'ultrasons en l'alumini fos.
- La utilització de l'aliatge Alumini-Silici (A356 i A357); Uns dels més comuns en el mercat.
- La utilització de nanotubs de carboni.

4.1. Fabricació continua d'un aliatge d'Alumini-Magnesi reforçat amb fibra utilitzant el mètode de la infiltració per ultrasons (Tadashi Matsunaga, Kenji Matsuda, Tomei Hatayama, Kenji Shinozaki, Makoto Yoshida)

Mètode d'impregnació de les fibres

La imatge [Fig. 4.1] mostra els aparells de fabricació de les fibres de carboni reforçades amb Alumini. El dispositiu consisteix en una bobina de fibres de carboni, un forn de preescalfament, un forn de fusió, un sonotrode i una bobina de recollida.

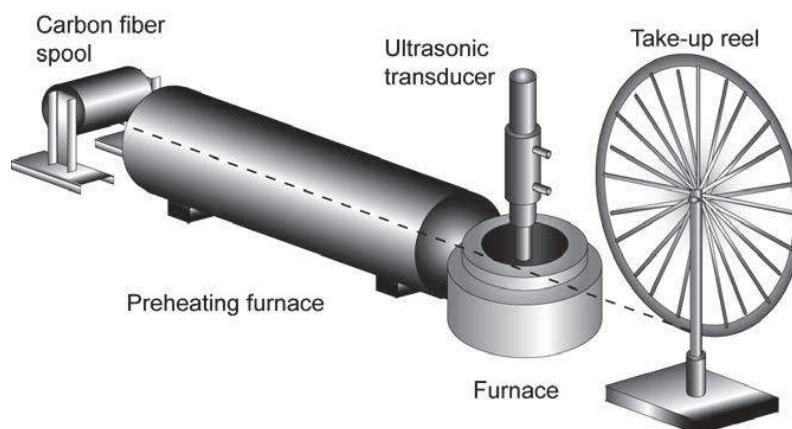


Figura 4.1: Dispositiu d'infiltració de les fibres [12]

Per eliminar l'agent pirolític d'encolatge de les fibres se les passa pel forn de preescalfament a 973K. En aquest forn se les hi insereix nitrogen a $1,65 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ per prevenir a les fibres de carboni de l'oxidació. Les fibres que surten d'aquest forn passen per l'orifici d'entrada, el diàmetre del qual és de 1,5mm. El feix de fibres es submergeix en l'aliatge d'alumini fos mentre passa per un forat de 5mm de diàmetre situat al centre del sonotrode.

A l'hora de fabricar el feix de fibres infiltrat amb aliatge d'alumini la superfície de les fibres de carboni s'han impregnat amb TiB_2 .

Condicions de fabricació

Els paràmetres variables amb els que l'autor de l'article ha fabricat els fils de carboni reforçats amb Alumini, mitjançant el mètode dels ultrasons, es mostren en aquesta taula.

Taula 4.1: Condicions de fabricació [12]

Velocitat de fabricació	0,03- 0,22 m/s
Temps de contacte amb l'alumini fos	6,7 – 0,91 s
Temperatura del metall fos	953 K
Freqüència dels ultrasons	18,5 kHz
Amplitud d'ona dels ultrasons	40 micres
Potència dels ultrasons	0 – 200 W
Diàmetre del forat	3 – 10 mm

Per investigar les condicions de fabricació òptimes s'han combinat la potència dels ultrasons, el diàmetre del forat del sonotrode i la velocitat de fabricació.

La velocitat de fabricació és inversament proporcional al temps d'aplicació dels ultrasons per a la infiltració de l'aliatge de Al en el feix de fibres.

- La velocitat de fabricació de 0.03, 0.10, 0.16 i 0.22 m/s indica el temps de contacte del metall fos de 6.7s, 2.0s, 1.3s i 0.9s.

La facilitat d'infiltració s'ha avaluat mitjançant la relació d'infiltració que es defineix com:

$$\text{Relació infiltració} = \frac{\text{àrea infiltrada}}{\text{àrea en secció transversal de fibra obtinguda}}$$

Els aliatges utilitzats han estat:

Taula 4.2: Composició química del aliatges utilitzats [12]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Alumini pur	0.01	0.11	0.01	0.01	0.04	-	0.01	-
Al-2.4 mass% Mg	0.10	0.19	0.03	0.05	2.37	0.16	0.04	0.14
Al-4.7 mass% Mg	0.05	0.12	0.01	0.06	4.66	0.06	0.01	0.09
Al-10 mass% Mg	0.10	0.10	0.00	0.03	9.97	0.01	0.01	0.05

Resultats

Efecte de cada paràmetre en la facilitat d'infiltració de l'alumini fos en el feix de fibres:

Efecte de la potència dels ultrasons:

La figura 4.2. mostra la relació entre la proporció d'infiltració i la velocitat de fabricació en el forat de 5mm de diàmetre en el cas del Al-2.4 % en massa de Mg utilitzant en la matriu. Els números inscrits al voltant de la marca indiquen la proporció d'infiltració. La relació d'infiltració és major al 90% utilitzant una potència ultrasònica de 200W, independentment a la velocitat de fabricació. A 200W, l'amplitud d'ona ha arribat als 40 μm .

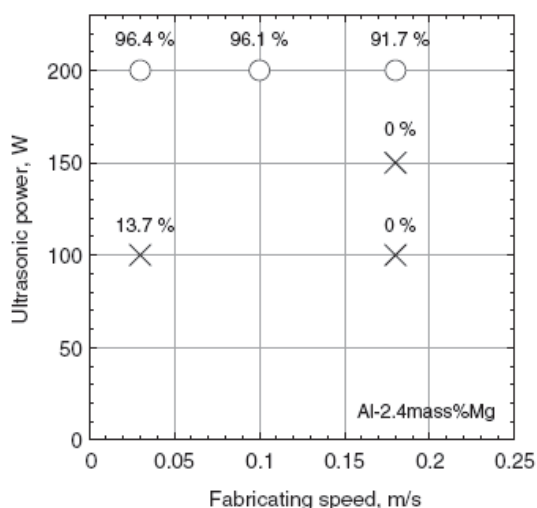


Figura 4.2: Influència de la potència dels ultrasons [12]

Efecte del diàmetre del forat

La Figura 4.3. mostra la influència del diàmetre del forat en el sonotrode en la relació d'infiltració a una potència de 200W, utilitzant Al-4.7% Mg.

La relació d'infiltració disminueix amb l'augment del diàmetre, independentment de la velocitat de fabricació. En el cas d'utilitzar un diàmetre de 3 i 5 mm, la relació d'infiltració és superior al 80%.

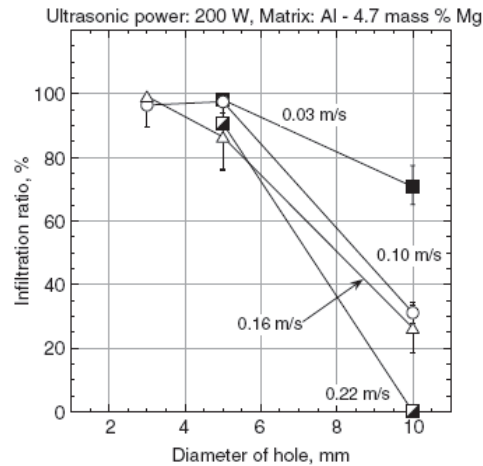


Figura 4.3: Influència del diàmetre del forat del sonotrode [12]

Efecte de la velocitat de fabricació

En la Figura 4.4. es mostra la influència de la velocitat de fabricació i el contingut de Mg en la relació d'infiltració. La relació d'infiltració es redueix amb un gradual augment de la velocitat de fabricació. En el cas del Al-10% Mg els compostos amb una relació d'infiltració amb promig del 98% es van obtenir a una velocitat de fabricació de 0,22m/s

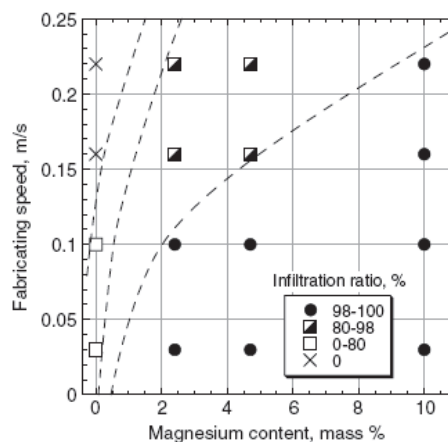


Figura 4.4: Influència de la velocitat de fabricació amb relació al contingut en Mg [12]

En la Figura 4.5. es mostren les seccions transversals dels cables CF/Al obtinguts sota diverses condicions.

La zona fosca de les seccions transversals de la matriu d'alumini mostren les zones no infiltrades, com es mostra en la matriu de Al-0% Mg.

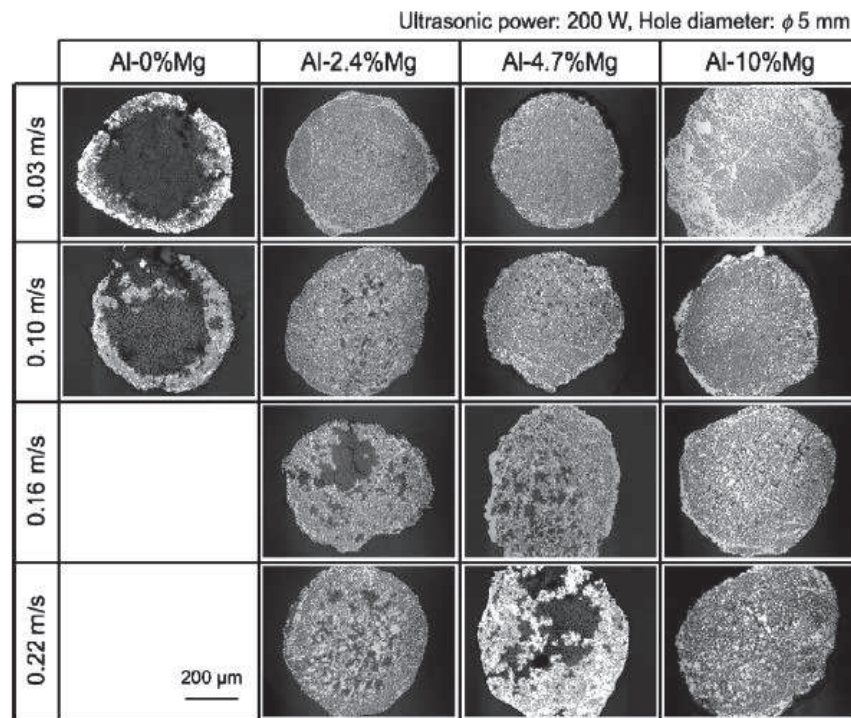


Fig. 5. Typical cross-sections of obtained CF/Al-Mg preform wires.

Figura 4.5: Seccions transversals CF/Al [12]

Efecte del contingut en Magnesi

A una velocitat de fabricació de 0,10 m/s, la relació d'infiltració és superior al 80% a partir d'utilitzar un aliatge de Al-2.4% Mg, com es mostra en la Figura 4.4. Aquesta tendència s'ha trobat també per a altres velocitats de fabricació. Per tant, es pot concloure que la adició de Mg és efectiva per a millorar la facilitat d'infiltració.

4.2. Efecte de la cavitació acústica en la infiltració d'aliatges d'alumini fos en fibres de carboni utilitzant el mètode d'infiltració per ultrasons. (Tadashi Matsunaga, Kenji Matsuda, Tomei Hatayama, Kenji Shinozaki, Makoto Yoshida)

El fenomen de la cavitació acústica és l'efecte químic dels ultrasons en els líquids. En so es transporta a través d'un líquid com una ona, amb cicles alterns de compressió i expansió. Si la ona d'expansió és suficientment poderosa, poden generar-se pressions negatives que comporten que les molècules comencin a separar-se formant microbombolles o cavitats.

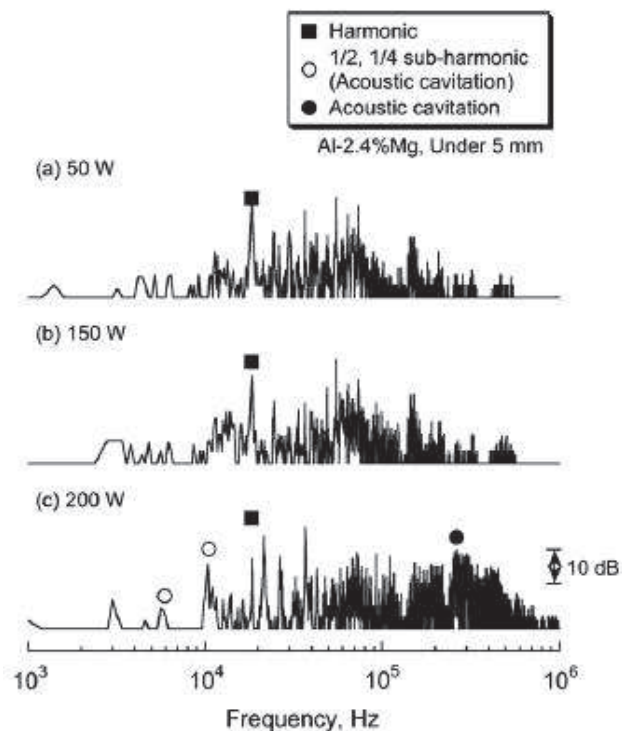
Durant els cicles poden arribar a unes dimensions crítiques, col·lapsar-se i generar una gran quantitat d'energia. Això provoca la fragmentació de les molècules (ruptura d'enllaços) generant espècies més petites.

Resultats

Efectes dels paràmetres del procés en la facilitat d'infiltració de l'aliatge d'alumini fos en les fibres de carboni i la generació de cavitació acústica:

Efecte potència dels ultrasons

L'efecte de la potència dels ultrasons en la generació de cavitació acústica ha estat examinada en l'aliatge Al-2.4% Mg. La Figura 4.6 mostra l'espectre de la pressió del so a una potència de 50, 150 i 200W. A 200W s'observen forts pics a 5, 10 i 260 kHz, que deuen estar causats per la cavitació acústica. Aquests pics no s'han trobat en potències inferiors a 150W. Per tant, la cavitació acústica tindrà lloc a potències superiors als 200W [Figura 4.6].



F

Figura 4.6: Espectre de la pressió del so [13]

La Figura 4.7 mostra la típica microestructura obtinguda de les fibres de carboni. La part fosca es tracta de la zona no infiltrada com es mostra a la Fig. 7(a). La Fig. 7(b) mostra la zona totalment infiltrada. La distribució de les fibres en el compost és relativament uniforme.

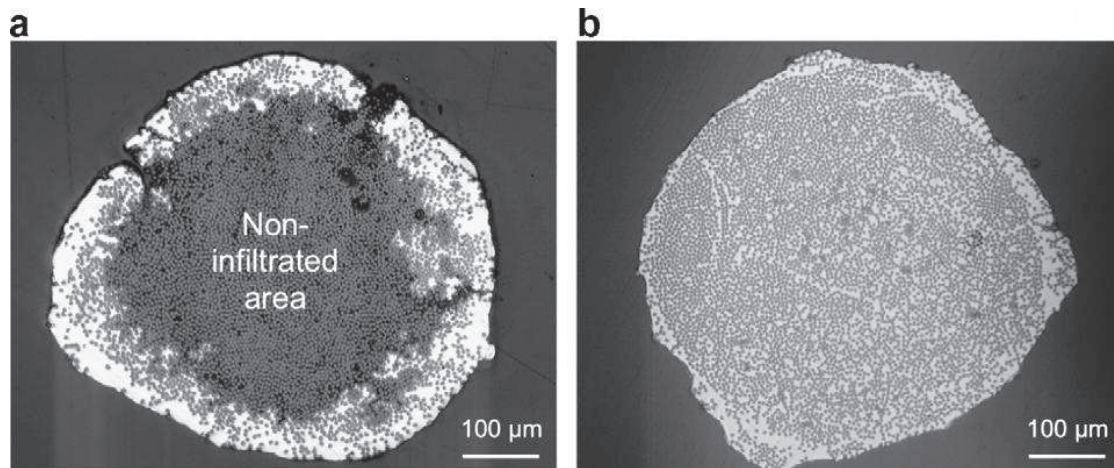


Figura 4.7: Micrografia obtinguda de les fibres de carboni [13]

La Figura 4.8 mostra la relació entre el ràtio d'infiltració de les fibres de carboni reforçades amb Al-2.4% Mg i la màxima intensitat a 260kHz. La aplicació de la vibració ultrasònica a la potència de 200W fa que la infiltració creixi del 0% al 100%, encara més, es produeix un increment de la intensitat màxima a 260kHz. Aquesta intensitat màxima seria causada per la generació o el col·lapse de la cavitació acústica. S'ha trobat que la facilitat d'infiltració dels aliatges era coherent amb la intensitat màxima a 260kHz. Així, sembla que la infiltració depèn en gran part de la cavitació acústica.

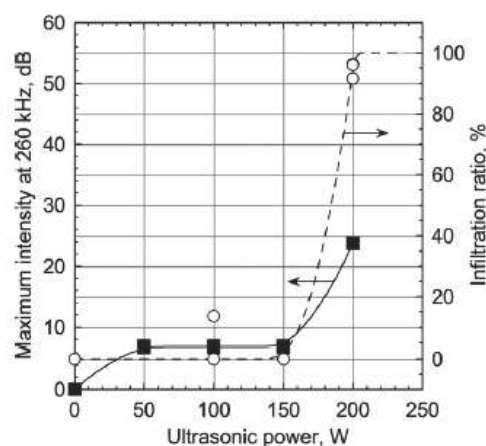


Figura 4.8: Relació entre el ràtio d'infiltració i la màxima intensitat de freqüència [13]

Efecte del contingut de Magnesi

La Figura 4.9. mostra els espectres de la pressió del so en el centre del forat del sonotrode quan s'aplica la vibració ultrasònica a l'aliatge d'Al-Mg a 200W. Com es mostra en la figura, els pics més forts s'observen a 5, 10 i 260 kHz in Al-2.4% Mg. Aquests pics no s'han observat en l'Alumini pur.

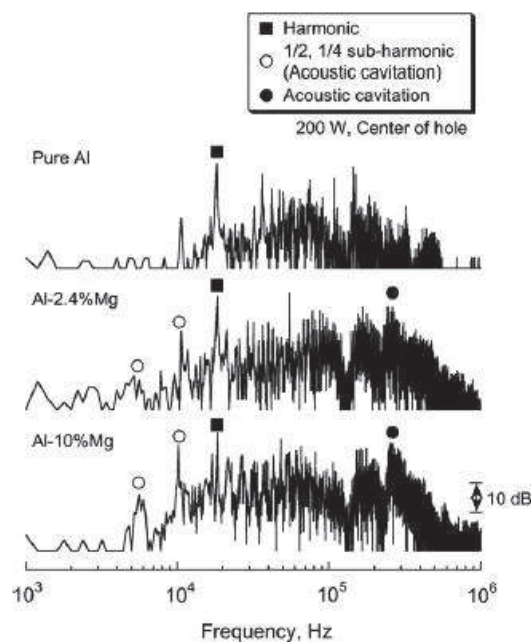


Figura 4.9: Espectres de la pressió del so en els aliatges Al-Mg [13]

La Figura 4.10. mostra la influència del contingut de Mg en el ràtio i la màxima intensitat a la freqüència de 260 kHz. La relació d'infiltració ha millorat degut a la adició de més de 2.4% de Mg en massa. Aquesta adició també ha conduït a un augment de la intensitat màxima a 260kHz. El pic de 260 kHz és degut al col·lapse de la cavitació acústica com ja s'ha mencionat anteriorment. Així doncs, la adició de Mg causarà la generació de cavitació acústica, i conduirà a una millora en la facilitat d'infiltració.

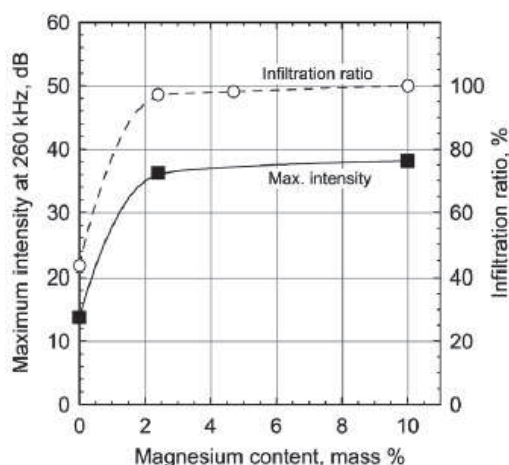


Figura 4.10: Influència del contingut de Mg [13]

5. Equipament i material

5.1. Aliatges d'alumini A356.0 i A357.0

Els materials d'estudi en el qual es basa el desenvolupament i la execució d'aquest projecte són l'aliatge d'alumini A356.0 i A357.0.

Aquests aliatges pertanyen a la sèrie 3xx.x. Són uns aliatges Alumini-Silici amb Magnesi [Taula 5.1]. Aquests es caracteritzen per ser uns aliatges tractables tèrmicament, amb una excel·lent col·labilitat i amb una gran resistència mecànica.

Les principals formes de conformació de peces són per mitjà de la fosa a pressió i de processos en estat semisòlid.

Una de les aplicacions d'aquests aliatges són les parts crítiques de les aeronaus i altres usos en l'automoció, on es necessària una combinació de soldabilitat i col·labilitat amb una bona resistència i duresa.

Taula 5.1: Composició química teòrica de l'aliatge A356.0 i A357.0 en % en pes [4].

Aliatge	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
A357	Base	6.50-7.50	0.20 màx.	0.20 màx.	0.20 màx.	0.10 màx.	0.40-0.70	0.20 màx.
A356	Base	6.50-7.50	0.20 màx.	0.20 màx.	0.10 màx.	0.25-0.45	0.10 màx.	-

Les principals propietats dels elements que formen l'aliatge són:

- El Silici en els aliatges d'alumini augmenta les propietats de moldeig, com són un augment de la fluïdesa i una gran capacitat de col·labilitat del material [4].
- El Coure augmenta la duresa dels aliatges d'alumini de fosa tractables o no tèrmicament. La vegada, el Coure generalment redueix la resistència a la corrosió [4].
- El Manganès normalment s'ha considerat una impuresa en els aliatges de fosa i es controla a nivells baixos en moltes de les composicions.
- El Magnesi és la base de la ductilitat i l'enduriment dels aliatges d'Alumini-Silici tractades tèrmicament, i també s'utilitza en aliatges més complexos que a més contenen Coure, Níquel i altres elements amb el mateix propòsit [4].

Taula 5.2: Propietats de l'aliatge d'alumini A356 i A357 [4].

Aliatge	Resistència a la ruptura en calent	Fluïdesa	Tendència a la contracció	Resistència a la corrosió	Mal·leabilitat	Soldabilitat
A 356.0	1	1	1	2	3	2
A357.0	1	1	1	2	3	2

1 bona – 5 dolenta

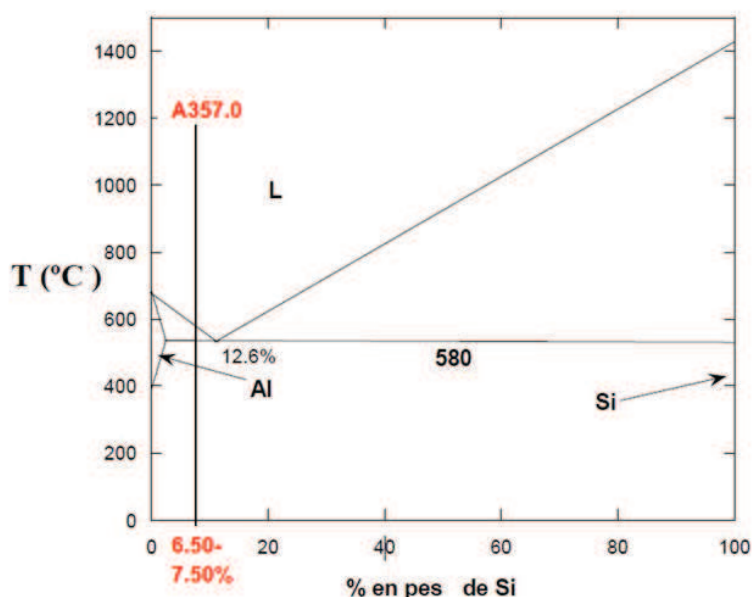


Figura 5.1: Diagrama de fases Al-Si

5.2. Fibra de carboni (FC)

La fibra de carboni és un material compost, constituït principalment per Carboni. L'estructura atòmica de la fibra de carboni és similar a la del grafit, consisteix en làmines d'àtoms de carboni arreglats en un patró regular hexagonal. La diferència recau en la manera en què aquestes fulles s'entrecreuen. El grafit és un material cristal·lí on les fulles se situen paral·lelament unes a les altres de manera regular. Les unions químiques entre les fulles és relativament feble, donant-li al grafit la textura tova i lluent característics. La fibra de carboni és un material amorf: les fulles d'àtoms de carboni estan atapeïdes, juntes. Això proveeix el seu corriment entre capes i incrementant de manera considerable la seva resistència.

Cada filament de carboni és la unió de milers de fibres de carboni. Un filament és un tub fi amb un diàmetre de 5-8 μm .

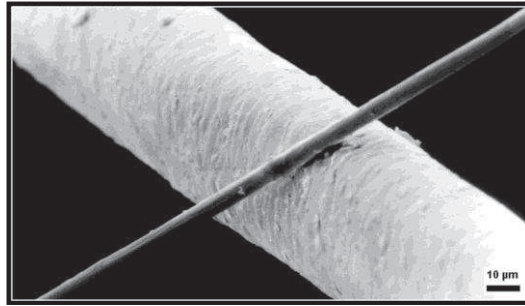


Figura 5.2: Filament de carboni de 6µm de diàmetre (des de sota a l'esquerra fins a dalt a la dreta), comparat amb un cabell humà

La densitat de la fibra de carboni és de 1.750 kg/m^3 . És conductor elèctric i de baixa conductivitat tèrmica. Aquest aspecte és un dels motius pels quals es treballa en aquest projecte. Si es s'aconsegueix la impregnació d'un feix de fibres de carboni amb alumini, el resultant es podria utilitzar per exemple en cables de comunicació, que han de ser conductors i molt lleugers.

Les propietats principals d'aquest material són:

- Elevada resistència mecànica, amb un mòdul d'elasticitat elevat.
- Baixa densitat, en comparació amb altres elements com per exemple l'acer.
- Elevat preu de producció.
- Resistència a agents externs.
- Gran capacitat d'aïllament tèrmic.
- Resistència a les variacions de temperatura, conservant la seva forma, només si s'utilitza matriu termostable.

5.3. Productes per al poliment i reactius químics d'atac de la proveta

El procés de preparació metal·logràfica de l'aliatge per poder realitzar un posterior anàlisi microscòpic, ha requerit l'ús de productes químics i de desbast:

- **Discs o panys de polida:** Són panys de Carbur de Silici impermeables que s'instal·len en la màquina de polir. Per evitar una gran fricció proveta-panys, la màquina treballa sempre afegint aigua de l'aixeta o destil·lada en funció del tractament.
S'ha fet servir diferents gruixos de grà dels panys de polida, de més gran a més fi: #180, #500, #800, #1200 i #4000.
- **Alúmina (Al_2O_3):** Compost químic que s'utilitza com a abrasiu per millorar la visualització de la micrografia en el microscopi òptic. Aquest compost es dilueix en H_2O en 3/10 part

5.4. Forn d'inducció

Els equips d'escalfament per inducció es troben classificats segons la potència de treball.

Taula 5.3: Forns d'inducció

Frequència	Designació de treball
Baixa (<50kHz)	Escalfament de peces de grans dimensions
Mitja-Alta (50kHz – 500kHz)	Escalfaments focalitzats, de peces de menor dimensió.

Per a la realització d'aquest projecte s'utilitzarà un escalfament per inducció en altes freqüències, ja que es treballarà amb provetes de petites dimensions.

L'equipament de treball és un forn d'alta freqüència de la marca *AMBRELL*, model Ekoheat [Fig. 5.3]. El forn està format per dos estacions d'escalfament, un cos principal i un software de treball instal·lat en el processador adjunt.



Fig. 5.3: a) Cos principal del forn d'inducció Ambrell Ekoheat.
b) Estació de treball manual
c) Estació d'escalfament

5.5. Aparell d'ultrasons

L'equip d'aplicació d'ultrasons treballa a una freqüència fixa de 20 kHz i a amplitud d'ona i potència regulables. Aquest aparell funciona a intervals de 10 segons de treball.

Es tracta d'un model de la marca *MECASONIC*.

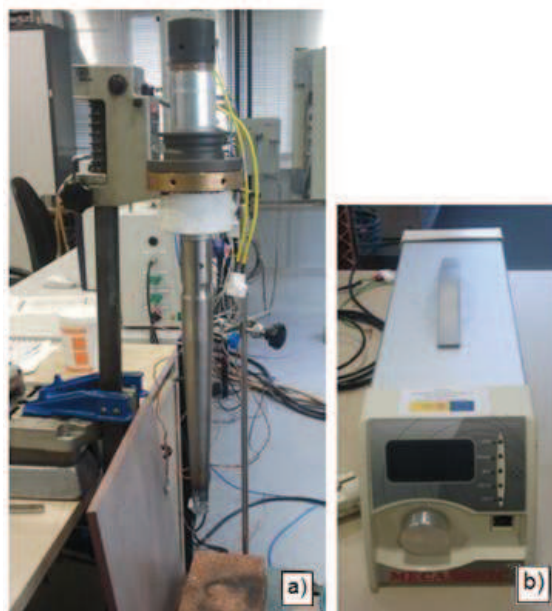


Figura 5.4: Aparell d'ultrasons
a) Sonotrode b) Estació de treball manual

Taula 5.4: Relació Nivell – Amplitud d'ona del Sonotrode

	Booster + sonotrode	Booster girat + sono.
Nivell	[μm]	[μm]
1	61	32
2	67	35
3	72	37
4	78	40
5	83	43
6	89	46
7	94	49
8	100	52
9	105	55
10	111	58

6. Mètode experimental

6.1. Mètodes d'introducció de les fibres de carboni en el grisol d'alumini fos

6.1.1. Mètode 1

En el primer procés experimental el feix de fibres de carboni s'ha introduït alhora que els fragments d'aliatge d'alumini que s'havien de fondre. A 650°C, quan les peces sòlides d'alumini començaven a fondre's el feix de fibres, per efecte de la calor i la diferència de densitat, quedaven doblegades i flotant parcialment per sobre de l'alumini fos.

Per molt que s'hagi intentat modificar la posició de les fibres no ha estat possible. Això ha dificultat el procés a l'hora de trobar les fibres i poder tallar les provetes per obtenir la bona visualització del feix de fibres.

En aquest mètode no s'han aplicat ultrasons.

6.1.2. Mètode 2

Com s'han trobat moltes dificultats amb el procediment anterior, s'han tingut que pensar diferents solucions. S'havia de comprovar el nivell d'impregnació de l'alumini sobre la superfície de les fibres de carboni i existia un greu problema alhora de realitzar les micrografies del tall d'aquestes. Per aquest motiu s'ha decidit experimentar també amb mines de llapis, formades per grafit, forma al·lotròpica del carboni.

Procediment

S'ha dissenyat un mecanisme que consisteix en fer 4 forats de 2mm de diàmetre a unes volanderes d'acer, per on passaran les mines de grafit. [Fig. 6.1. a)]

Les mines de grafit mantindran la posició quan es produeixi la fosa de l'aliatge d'alumini. Així doncs, el tall seccional i l'anàlisi microestructural de les provetes es podrà realitzar de manera senzilla.

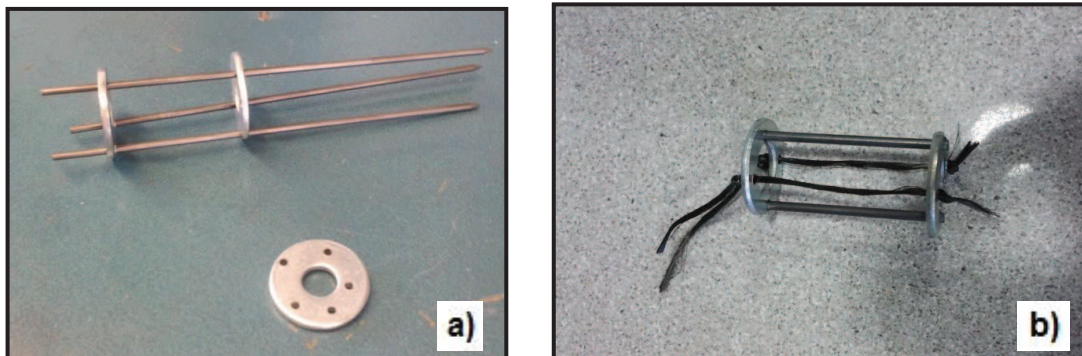


Figura 6.1: Mecanisme per mantenir rectes les mines de grafit

Les volanderes mantindran la forma un cop l'aliatge d'alumini es trobi fos a 650°C, ja que la temperatura de fusió de l'acer és més elevada que la de l'alumini (aproximadament 1.400°C).

S'ha aprofitat la rigidesa que proporcionaven les 2-3 mines de grafit al mecanisme per col·locar un feix de fibres tens entre els forats restants [Fig. 6.1. b)]

En primer lloc s'escalfarà l'aliatge d'alumini en un grisol més gran fins als 650-660°C. Posteriorment es col·larà en el grisol més petit on hi serà el mecanisme que subjecta les mines i el feix de fibres. Aquest s'introduirà de manera vertical en el grisol perquè els ultrasons arribin de manera més eficient a les mines de grafit i a les fibres de carboni.

Amb la utilització d'un grisol més petit, no només s'estalvia en la quantitat d'alumini de la fosa, sinó que s'aconsegueix un major efecte dels ultrasons en l'alumini fos per l'efecte rebot de les parets.

6.2. Escalfament per inducció amb aplicació d'ultrasons

Per a la realització del present projecte, s'ha analitzat prèviament el mètode d'escalfament, ja que a l'hora de treballar amb un equip nou, no es coneixien els detalls del mateix.

Utilització del forn d'inducció d'alta freqüència

Els mecanismes que s'han creat per mantindre les mines de grafit i el feix de fibres en una posició vertical no són compatibles a l'hora de fondre les peces d'alumini en el grisol. Per aquest motiu s'ha tingut que treballar amb la col·lada de l'alumini líquid d'un grisol més gran al grisol on es troba el mecanisme amb les fibres.

La programació del forn d'inducció és relativament senzilla, tot i que s'ha de tindre especial compte amb la seguretat dels que manipulen les provetes o els grisols.

Des del monitor central [Fig. 5.3. a)], i seguint uns senzills passos, és programa el tipus d'escalfament:

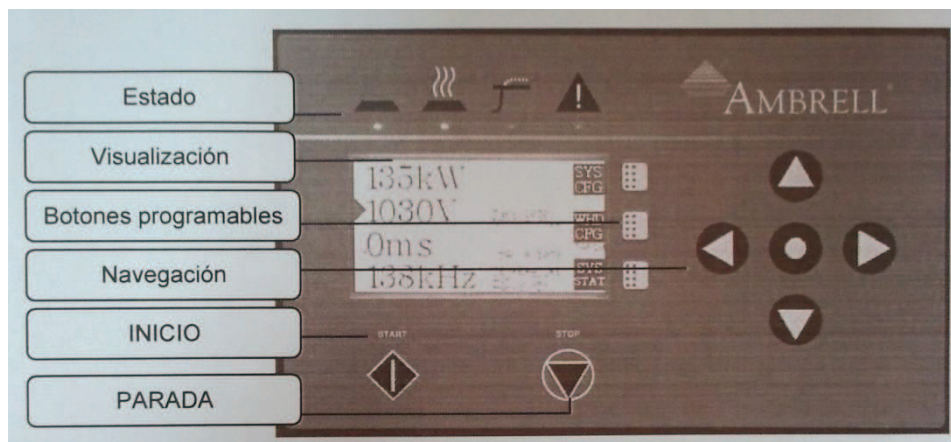


Figura 6.2: Monitor Central del forn d'inducció

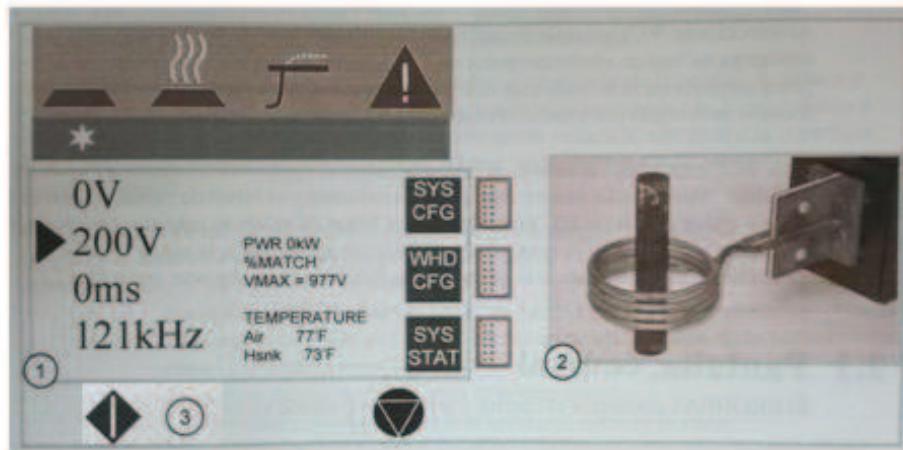
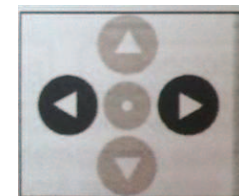
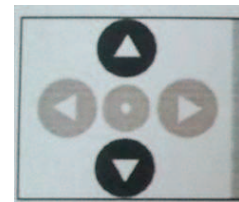


Figura 6.3: Selecció de paràmetres forn d'inducció

1. Comprovar que la vàlvula d'aigua del sistema estigui oberta
2. Comprovar que no hi hagi ningun tipus de peça de treball en la bobina.
3. Comprovar que tots els dispositius de seguretat estiguin desbloquejats i tancats elèctricament.
4. Engegar el forn d'inducció.
5. Utilitzar els botons Seleccionar per destacar el *Paràmetre d'ajustament* o *Temporitzador* i per desplaçar-se per les llistes de en la pantalla. (1).
6. Utilitzar els botons d'Ajustar per canviar els valors de *Paràmetre d'ajustament* (2).
7. Prémer Inici per començar l'escalfament per inducció (3).
8. Prémer Parada per detenir l'escalfament per inducció.



Els paràmetres es poden canviar al llarg de l'escalfament per, per exemple, reduir el voltatge per mantenir la temperatura durant l'aplicació dels ultrasons.

El procés d'escalfament que s'ha utilitzat en el primer grisol ha estat:

Taula 6.1: Procés d'escalfament de l'aliatge d'alumini en el primer grisol

Material	Temperatura (°C)	Voltatge (V)	Inducció	Temps de manteniment (s)
A356.0	Fusió total fins als 660°C	400	continua	Fins la fusió total de les peces d'alumini (depèn de la quantitat)

Un cop basat l'aliatge d'alumini fos en el segon grisol, aquest es refreda degut al temps que transcorre el primer i el segon fora de la bobina d'inducció. Conseqüentment s'ha de tornar a fondre l'alumini fins l'estat líquid per poder aplicar els ultrasons.

El procés d'escalfament del segon grisol es realitza també a un voltatge de 400V, inducció continua i fins que l'alumini arribi a la temperatura d'aplicació d'ultrasons desitjada.

Quan s'introdueix el sonotrode en l'aliatge fos, aquest redueix la temperatura de l'alumini degut a la diferència que hi ha entre les dues parts. La temperatura variarà en tots els processos així que s'anotarà en cadascun d'ells.

Utilització de l'aparell d'ultrasons

L'aplicació dels ultrasons és realitza sempre quan l'aliatge d'alumini es troba en estat líquid i a la temperatura que es vulgui realitzar aquell procés experimental. Aquesta temperatura sempre serà superior als 600°C, on l'alumini es troba entre l'estat líquid i el semisòlid. Si la temperatura baixés dels 595-600°C l'aliatge d'alumini es solidificaria i no es podria extreure la banya del sonotrode.

L'aparell d'ultrasons treballa sempre a una freqüència fixa de 20 kHz i una potència i amplitud d'ona regulables. Cada cop que s'acciona l'interruptor es generen ultrasons durant 10 segons.



Figura 6.4: Col·locació de l'aliatge per a l'escalfament del mateix

Al finalitzar l'escalfament, s'ha revisat l'estat dels termoparells i del sonotrode, netejant possibles restes de material per assegurar el contacte amb el material d'assaig.

6.3. Refredament de les provetes

El refredament de les provetes s'ha realitzat en l'aire, sense realitzar cap tremp en aigua o en cap líquid.

6.4. Nomenclatura de les provetes

- Primera dígit: Mostra (M).
- Segon dígit: número d'assaig realitzat a aquesta proveta.
- Tercer dígit: número de secció de la proveta.
- Quart dígit: Superior (S) cara més propera al sonotrode – Inferior (I) cara més llunyana al sonotrode.

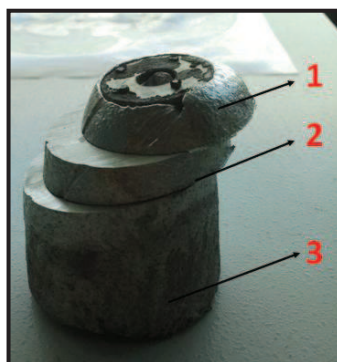


Figura 6.5: Exemple de proveta

6.5. Preparació de la metal·lografia

Elecció i tall de la secció d'estudi

En aquesta part del projecte s'han realitzat dos tipus diferents de talls. Això es degut a que en les primeres provetes no es coneixia la posició final del feix de fibres i, en les següents, gràcies al mecanisme que sostenia el feix de fibres sí.

Com ja s'ha esmentat en l'apartat anterior, en les 4 primeres provetes (M1, M2, M3 i M4), el feix de fibres de carboni s'introduïa en el grisol i perdia la posició en la que es trobava inicialment. Per aquest motiu s'ha decidit tallar la proveta en 4 parts (cada 10mm) per tractar de trobar el feix de fibres [Fig. 6.6]

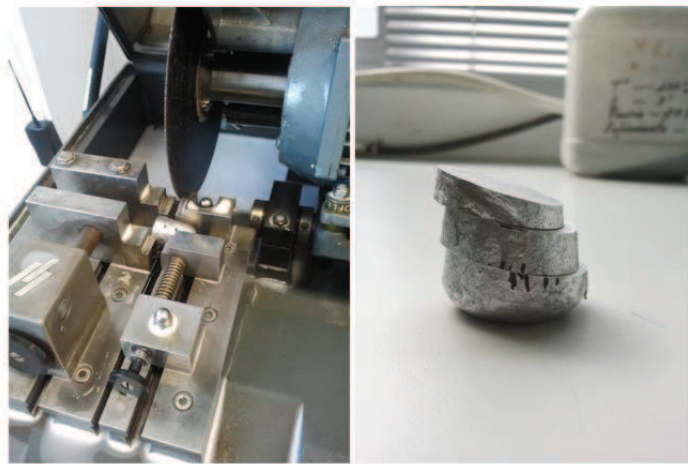


Figura 6.6: Seccions de talls de la proveta

Prensa de muntatge

Les provetes, quan són extretes del grisol, no tenen una forma uniforme. Aquest fet fa que després de tallar-les s'hagi d'obtenir una forma cilíndrica per poder utilitzar la desbastadora. Aquesta forma s'aconsegueix mitjançant la premsa de muntatge de provetes. L'embotiment d'aquestes es pot realitzar amb una resina normal o un altre de conductora. Aquesta última és necessària per poder analitzar les microestructures al microscopi electrònic.



Figura 6.7: Proвета cilíndrica mitjançant resina

Desbast i polit de la proveta

Per l'observació microgràfica és necessari obtenir la superfície nítida. En conseqüència, les provetes han sigut sotmeses a un procés de desbast [Taula 6.2] i polit [Taula 6.3].

Taula 6.2: Procés de desbast de les provetes

Procés	1	2	3	4	5
Superfície	SiC-paper	SiC-paper	SiC-paper	SiC-paper	SiC-paper
Abrasiu	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Mida de gra	#180	#500	#800	#1200	#4000
Lubricant	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
r.p.m.	250	250	250	250	250
Força [N]	20	20	20-15	20-15	15
Temps [min]	15	15	15	10	10

Taula 6.3: Procés de polida de les provetes

Procés	1	2
Superfície	MD-Nap	MD-Nap
Abrasiu	Alúmina (Al ₂ O ₃)	Alúmina (Al ₂ O ₃)
Mida de gra	1µm	0,3µm
Lubricant	Aigua destil·lada	Aigua destil·lada
r.p.m.	125	125
Força [N]	5-10	5-10
Temps [min]	15	15

Després de cada desbast o polit les provetes s'han rentat amb aigua a pressió i sabó per eliminar la brutícia del procediment al que han estat sotmeses. Posteriorment s'han rentat amb aigua destil·lada i s'han assecat abans del següent procés.

Per evitar l'acumulació de brutícia als porus de les provetes, aquestes s'han introduït en l'aparell d'ultrasons durant 3-4 minuts.

Si a l'hora de visualitzar la microestructura de la proveta es segueix apreciament la superfície ratllada, es repeteixen els processos a partir del desbast amb el disc #4000 per eliminar aquestes.

Un cop es tenen les provetes acabades, per mantenir-les seques i deshidratades s'introdueixen en el dessecador fent el buit. D'aquesta manera, gràcies a les sals dessecants, es mantenen seques i s'evita l'oxidació.

7. Resultats experimentals

7.1. Assajos previs: Estudi dels paràmetres en l'escalfament

El resultat final d'un escalfament per inducció està relacionat amb els paràmetres d'escalfament utilitzats. Per aquesta raó, s'ha realitzat un petit estudi dels paràmetres per determinar l'efecte que causen en el resultat final.

7.1.1. Estudi del voltatge

En primer lloc, s'ha analitzat l'efecte que ofereix el voltatge de treball. Segons el voltatge aplicat, la velocitat d'escalfament serà major o menor fins a arribar a l'estat líquid, que s'aconsegueix als 650°C:

- **A 500V:** S'ha aconseguit una temperatura de 650°C en 265s (aproximadament 4min 30s), però en cap moment s'ha pogut homogeneïtzar aquesta temperatura i per tant no s'ha continuat fent l'assaig amb aquest voltatge.
- **A 350V:** S'ha aconseguit una temperatura de 650°C en 595s (10 minuts aproximadament) . Aquesta temperatura era homogènia, ja que la diferència entre el termoparell del centre i el de l'extrem no ha augmentat en més de 5°C.

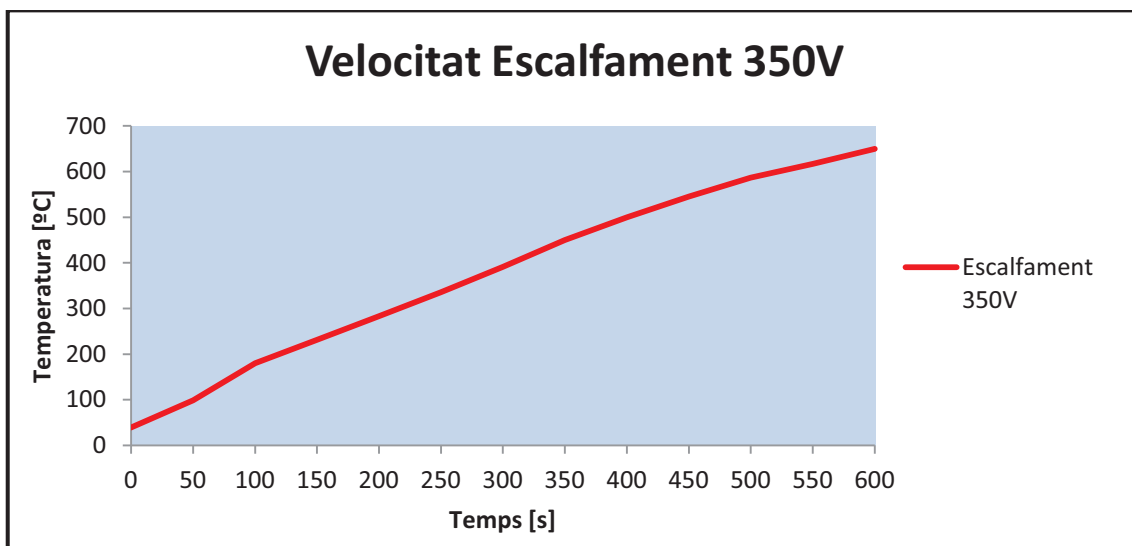


Figura 7.1: Velocitat d'escalfament a 350V

La proveta ha trigat un temps excessiu a arribar a l'estat líquid (650°C), que en comparació amb altres projectes era de 2-3 minuts aproximadament, treballant amb aquest voltatge. En aquest procés ha estat d'uns 10 minuts degut, exclusivament, a la utilització d'una bobina d'inducció gran en relació amb la grandària del grisol.

Un dels aspectes dels que depèn l'escalfament per inducció és l'eficiència de l'acoblament. Aquest és la relació que existeix entre el corrent que hi ha en el material de treball i la distància entre aquest i la bobina. Disminuint la distància entre tots dos, s'aconsegueix un acoblament tancat, augmentant així la intensitat de corrent i, per tant, la quantitat de calor produïda en la peça.

S'ha tingut que treballar amb aquestes condicions degut a que s'havia de fondre, en primer lloc, l'aliatge d'alumini en un grisol més gran on cabessin els fragments no mecanitzats del propi alumini. I posteriorment, en la mateixa bobina, s'introduïa el grisol petit amb el mecanisme que aguantava el feix de fibres i es col·lava l'alumini del gran.

Quan s'aconsegueix la temperatura desitjada per realitzar l'assaig, s'introdueix el sonotrode en el grisol. En aquest moments s'aplica un escalfament continu a 150V per mantenir la temperatura durant l'acció dels ultrasons.

7.2. Esquema dels assajos realitzats

A l'hora de determinar els processos d'aplicació d'ultrasons, s'ha procedit a la realització dels assajos, per posteriorment analitzar els resultats obtinguts.

En la següent taula es mostra un breu resum de tots els assajos.

Taula 7.1: Classificació assajos

Mètode	Proveta	Temp. Inicial aplicació ultrasons (°C)	Temp. Final (°C)	Amplitud d'ona (µm)	Potència Màxima (W)	Potència Mitja (W)	Temps aplicació ultrasons (s)
1	1	650	650	-	-	-	-
	2	650	650	-	-	-	-
	3	650	650	-	-	-	-
	4	650	650	-	-	-	-
2	5	650	625	78	250	230	40
	6	650	625	61	200	180	40
	7	650	633	111	310	270	40
	8	700	665	111	320	280	60
	9	600	595	111	290	250	60

7.3. Assajos sense aplicació d'ultrasons, utilitzant recobriments de Coure

7.3.1. Assaig M1, M2, M3 i M4

En tots els assajos del mètode 1 les condicions de treball han estat les mateixes, inducció a 350V, amb un escalfament fins a 650°C. Mantenint-lo al llarg de tot el procés.

Les fibres han estat tractades amb diferents processos de recobriment per comprovar si existia millora en la impregnació.

Taula 7.2: Procés a que es sotmet el feix de fibres (Mètode 1)

Nomenclatura de la proveta	Procés a que es sotmet
M1	Neta amb alcohol + Cu
M2	No neta + Cu
M3	Neta amb alcohol + PdCl ₂ + Cu
M4	No neta + PdCl ₂ + Cu

Com ja s'ha comentat en aquests assajos el feix de fibres de carboni s'ha introduït alhora que els fragments d'aliatge d'alumini que s'havien de fondre. A 650°C, quan les peces sòlides d'alumini començaven a fondre's el feix de fibres, per efecte de la calor i la diferència de densitat, quedaven doblegades i flotant parcialment per sobre de l'alumini fos.

Per molt que s'hagi intentat modificar la posició de les fibres no ha estat possible. Això ha dificultat el procés a l'hora de trobar-les i poder tallar les provetes per tal d'obtenir una bona visualització del feix.

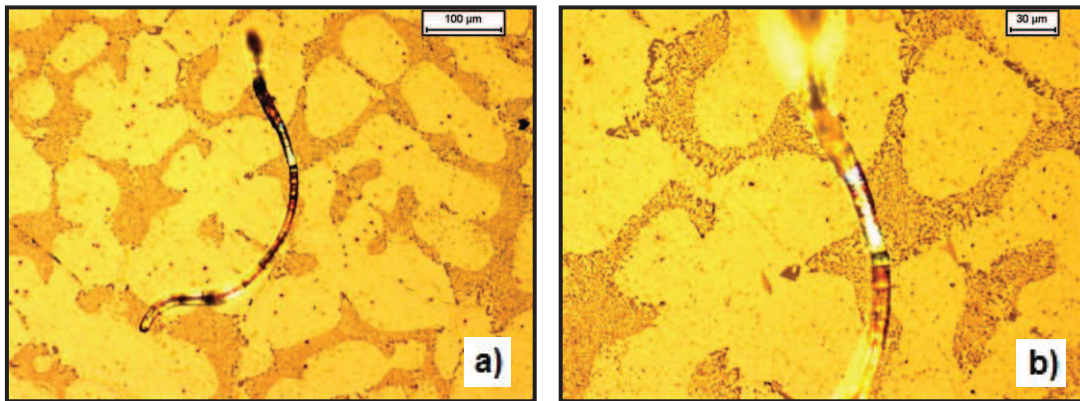


Figura 7.2: a) Micrografia Proveta M4 10X; b) Visualització de a) a 20X

En les micrografies a) i b) es mostra l'estructura de l'aliatge de treball A357.0 sotmès a un escalfament fins als 650°C a un voltatge de 350V.

S'observen dues estructures diferents, una es tracta de l'espai interdendrític de l'eutèctic (d'un color més fosc) i les dendrites de la fase α (de color més clar). També es pot apreciar com glòbuls de la fase β han quedat atrapats per la fase α . Aquests glòbuls han quedat atrapats perquè necessiten més temps per arribar a la frontera de gra. [Fig. 7.2. a)].

Pel que respecta a la impregnació de les fibres amb l'aliatge d'alumini, no s'ha trobat cap fibra tallada de manera transversal. Això ha dificultat l'anàlisi de la possible impregnació amb l'aliatge.

Les úniques fibres que s'han trobat han estat seccionades de manera longitudinal i s'han després de la superfície de la proveta quan es realitzava el desbast. En la Fig. 7.2. b) es pot veure el solc que el feix de fibres ha deixat en l'aliatge d'alumini. No s'observa cap mena de precipitat eutèctic en els bordes del solc que pogués fer pensar en una possible impregnació. La lluentó que mostren les micrografies es originada per dos successos: L'enfocament de la micrografia, ja que per visualitzar de manera correcta l'estructura de l'alumini s'ha d'enfocar la superfície fent que el solc, que és més profund, quedi exposat a un raig de llum diferent que es reflexa de manera diferent. L'altre possibilitat és que a l'hora del desbast, el recobriment de Cu s'hagi quedat en els bordes del solc. Així doncs es pot concloure que no existeix la impregnació de les fibres de carboni en l'aliatge A357.0 per a aquestes variables del procés experimental.

7.4. Assajos amb aplicació d'ultrasons

7.4.1. Assaig M5

Les condicions de treball d'aquest assaig ha estat un escalfament a 350V fins a 650°C.

Amb la introducció de la banya del sonotrode en l'aliatge, la temperatura d'aquest s'ha reduït fins als 614°C.

S'han aplicat ultrasons amb una longitud d'ona de 78µm i una potència mitja de 230W durant 40 segons. La potència màxima registrada per l'aparell d'ultrasons en aquest procés ha estat de 250W.

Durant l'aplicació dels ultrasons el forn d'inducció ha estat treballant a 150V per mantenir la temperatura. La temperatura al final del procés ha estat de 625°C.

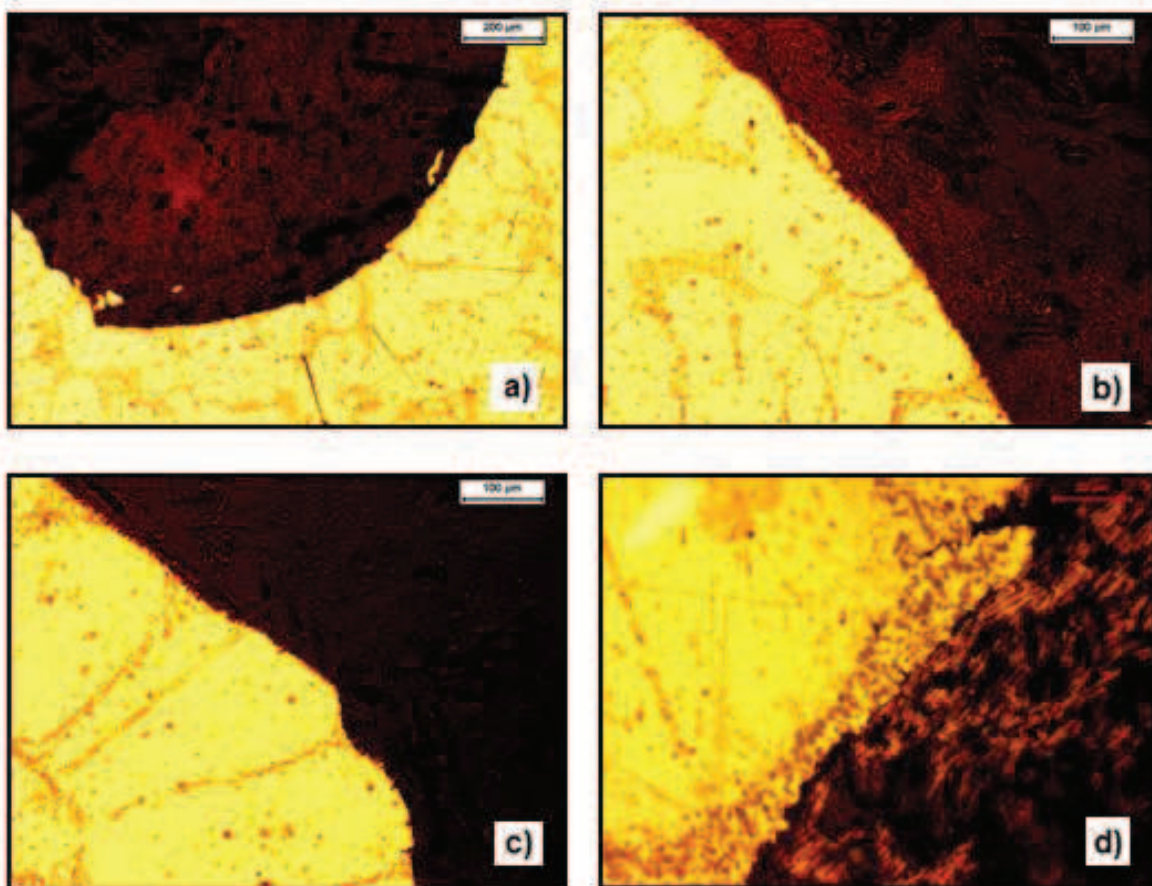


Figura 7.3: Micrografies Proveta M5.3.S. Mines de grafit: a) 5X; b) 10X; c)10X; d) 50X

La Figura 7.3. a) mostra la microestructura de la Proveta M5.3.S. Com ja s'ha explicat abans, la nomenclatura d'aquesta proveta determina la proximitat del tall al generador d'ultrasons i la part que s'ha analitzat, si la superior o la inferior de la mateixa. En la imatge captada pel microscopi òptic es pot veure que la fase α pren una forma

totalment dendrítica amb una mida de les dendrites de entre 200 i 300µm. En referència al micro-constituent eutèctic es pot observar que no existeix un gran guix interdendrític, fet que fa que les dendrites es trobin molt a prop unes de les altres [Fig. 7.3. – c)].

En la Figura 7.3. a) sembla que cristalls de Silici proeutèctics precipitin al contorn de la mina de grafit. A més augmenta però, es veu que es tracta de fase β que es empena cap al límit de gra per les altres dendrites. [Fig. 7.3. – d)]. Tot i així s'observa una bona adherència de l'aliatge d'alumini a les mines de grafit a aquestes condicions experimentals.

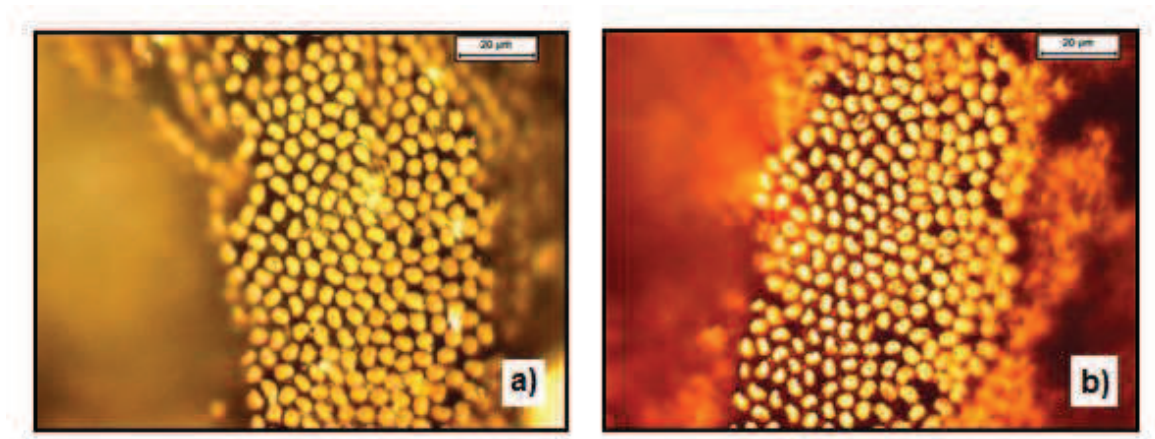


Figura 7.4: Micrografies proveta M5.3.S. Fibres de Carboni: a) 50X; b) Mateixa micrografia amb enfocament inclinat.

S'han pres micrografies de les fibres de carboni introduïdes en l'aliatge d'alumini, com mostren la Figura 7.4. Com es pot apreciar en les imatges captades pel microscopi òptic, no apareix alumini al voltant dels nanotubs de carboni. Per aquest motiu no s'han realitzat micrografies en el microscopi electrònic, que ens podrien mostrar fins i tot els percentatges dels constituents de l'aliatge d'alumini propers a les fibres.

7.4.2. Assaig M6

Les condicions de treball d'aquest assaig ha estat un escalfament a 350V fins a 650°C.

Amb la introducció de la banya del sonotrode en l'aliatge, la temperatura d'aquest s'ha reduït fins als 614°C.

S'han aplicat ultrasons amb una longitud d'ona de 61µm i una potència mitja de 180W durant 40 segons. La potència màxima registrada per l'aparell d'ultrasons en aquest procés ha estat de 200W.

Durant l'aplicació dels ultrasons el forn d'inducció ha estat treballant a 150V per mantenir la temperatura. La temperatura al final del procés ha estat de 620°C.

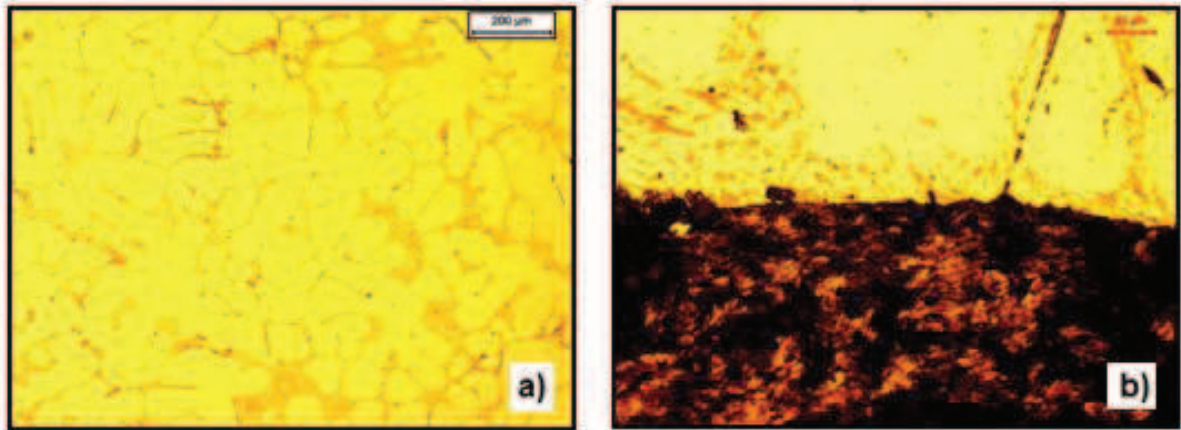


Figura 7.5: Micrografies Proveta M6.3.S. Mines de grafit: a) Microestructura de la proveta; b) Zona de contacte amb el grafit.

La micrografia de la Figura 7.5. a) és bastant semblant a la de la Proveta M5.3.S. Tot i haver estat sotmeses a diferents amplituds d'ona, mantenen l'estructura dendrítica amb un dimensió del grà una mica més gran. Per altre banda, el gruix de l'espai interdendrític és menor.

S'observen petites proporcions de micro-constituent eutèctic ocloses en la fase α .

També en aquest cas, la adherència de l'aliatge d'alumini A356.0 amb les mines de grafit sembla bona.

7.4.3. Assaig M7

Les condicions de treball d'aquest assaig ha estat un escalfament a 350V fins a 650°C.

Amb la introducció de la banya del sonotrode en l'aliatge, la temperatura d'aquest s'ha reduït fins als 633°C.

S'han aplicat ultrasons amb una longitud d'ona de 111µm i una potència mitja de 270W durant 40 segons. La potència màxima registrada per l'aparell d'ultrasons en aquest procés ha estat de 310W.

Durant l'aplicació dels ultrasons el forn d'inducció ha estat treballant a 150V per mantenir la temperatura. Aquesta ha estat de 633°C al final del procés.

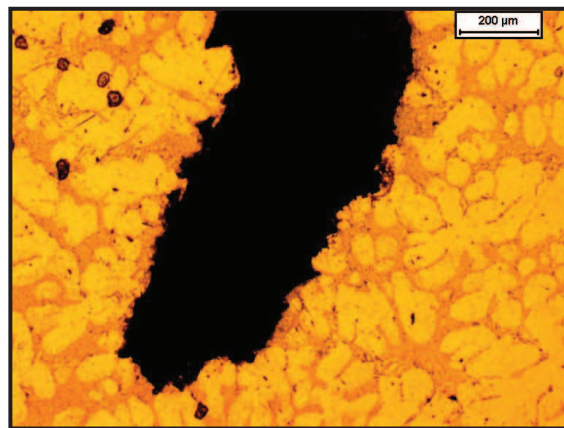


Figura 7.6: Microestructura Proveta M7.3.S.

En la microestructura que es mostra en la Figura 7.6. s'observa un espai interdendrític molt major que en les dos provetes anteriors. Aquest rodeja per complet la fase α .

Els glòbuls de micro-costituent eutèctic oclusos han arribat al límit de gra amb l'augment de l'amplitud d'ona.

S'han reduït les dimensions de l'estructura dendrítica, en aquest assaig les dimensions dels grans no superen els 200µm.

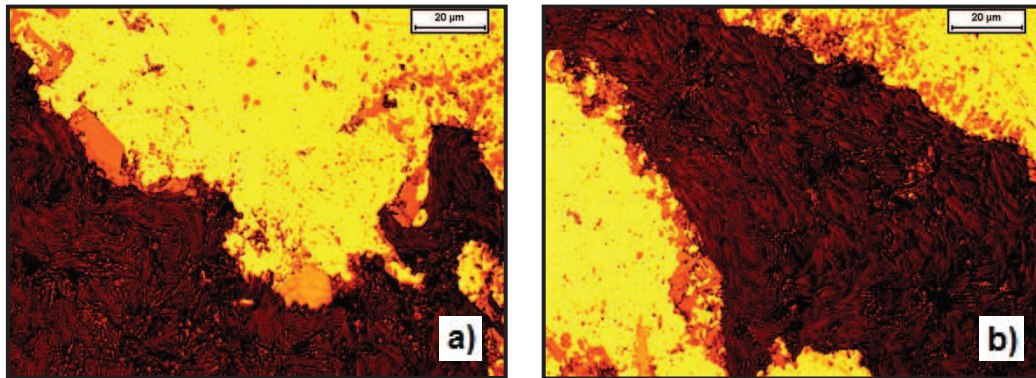


Figura 7.7: Micrografies Proveta M7.3.S Mines de grafit: a) Zona 1; b) Zona 2.

S'observa Silici primari en forma de cristalls grans i poligonals. Es tracta de Silici proeutèctic que precipita al límit de gra i ho fa abans que la fase β . [Fig. 7.7. a)].

El Silici de la Figura 7.7. a) es troba al límit de gra amb el Carboni. Això significa que no es tracta de Silici eutèctic, característic de les zones interdendrítiques, i que és possible que l'aplicació d'ultrasons a una amplitud d'ona de 111µm i una potència de 270W faciliti la precipitació de Silici proeutèctic en el límit de gra amb el Carboni.

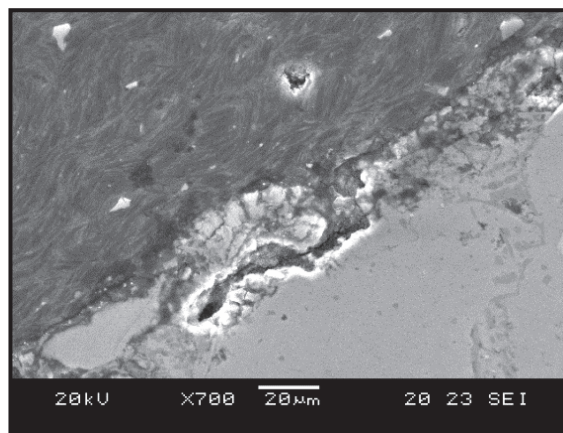


Figura 7.8: Micrografia SEM Proveta M7.3.S. Mines de grafit

Per observar més detalladament el que succeïa al límit de gra, s'han realitzat micrografies amb el microscopi electrònic. Amb la interacció entre els electrons del feix projectat i els àtoms de la mostra, es poden conèixer els elements metàl·lics que conté la mostra i la seva distribució.

En la Figura 7.8. a) s'observa com hi ha un contacte sense cap mena de forat entre la mina de grafit i, en aquests cas, la fase eutèctica de l'alumini, composta per Si i Al.

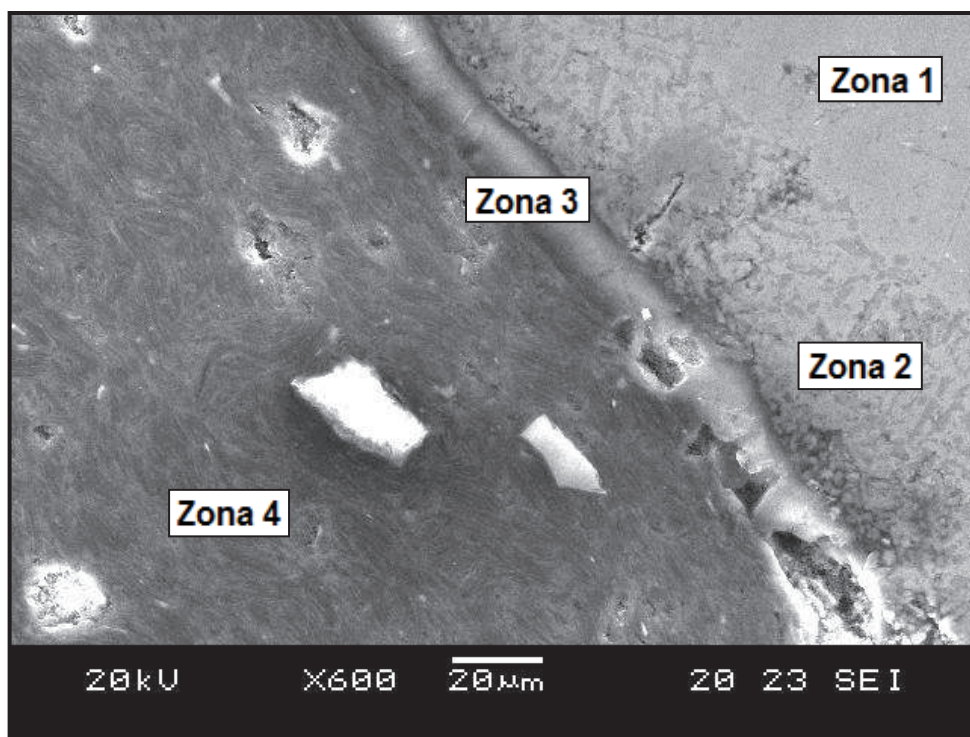


Figura 7.9: Micrografia SEM Proveta M7.3.S. Mines de grafít

En la Figura 7.9. S'ha observat una línia de material en el límit de gra amb la mina de Carboni [Zona 3] composta per Oxigen, Silici i Alumini. Es pot predir que segurament sigui algun tipus d'òxid creat per la reacció dels dos metalls amb l'Oxigen. Aquesta reacció s'ha produït degut a l'atac de la proveta amb Alúmina (Al_2O_3), que conté l'oxidant.

D'aquesta micrografia s'han pogut extreure diversos continguts com, per exemple, la composició de les mines de grafit, representada en la següent taula:

Taula 7.3: Percentatges d'elements continguts en les zones d'estudi de la Proveta M7.3.S. Grafit

	Elements (%)					
Zona	Al	Si	C	O	Ca	Fe
1	96,52	3,48	-	-	-	-
2	63,97	28,83	-	7,20	-	-
3	36,03	1,08	-	62,89	-	-
4	3,21	6,71	60,45	23,57	2,83	3,23

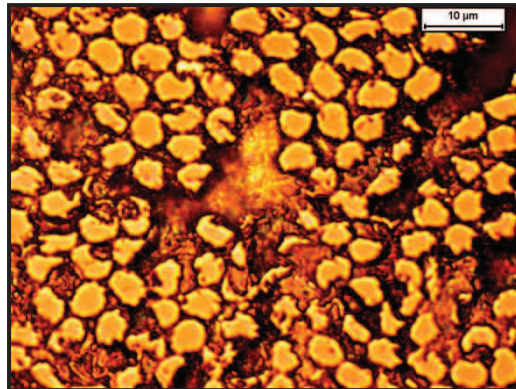


Figura 7.10: Micrografies Proveta M7.3.S. Fibres de Carboni

La observació de les fibres de carboni amb el microscopi òptic no és del tot concloent ja que, per exemple, com passa en la Fig. 7.10. es podria dir que l'alumini s'adhereix al 100% en les fibres de carboni i que, com es veu en la imatge, les zones més fosques són les ombres produïdes pel raig de llum. Per corroborar aquesta primera opinió s'han capturat imatges amb el microscopi electrònic de les fibres. [Fig. 7.11].

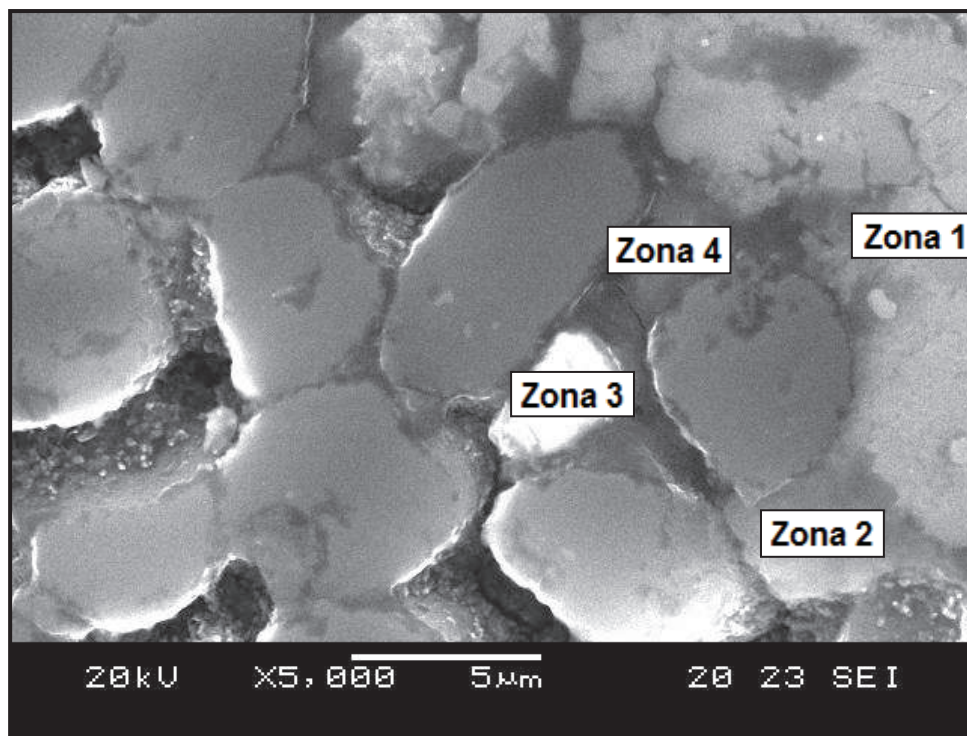


Figura 7.11: Micrografia Proveta SEM M7.3.S. Fibres de Carboni

Taula 7.4: Percentatges d'elements continguts en les zones d'estudi de la Proveta M7.3.S. Fibres

Zona	Elements (%)					
	Al	Si	C	O	Ca	Fe
1	50,75	10,91	28,13	10,21	-	-
2	30,95	1,02	30,95	48,45	1,19	3,83
3	1,80	37,80	-	5,56	-	-
4	41,02	0,98	10,73	41,67	0,66	3,56

En la Figura 7.11. s'observa una bona adherència de la Zona 2 a la fibra de carboni, probablement facilitada per l'aparició d'un òxid d'Alumini. La creació d'un òxid en la superfície de les fibres de carboni és un bon indicatiu, ja que significa que l'òxid està en contacte amb la superfície de les fibres.

7.4.4. Assaig M8

Les condicions de treball d'aquest assaig ha estat un escalfament a 350V fins a 700°C.

Amb la introducció de la banya del sonotrode en l'aliatge, la temperatura d'aquest s'ha reduït fins als 654°C.

S'han aplicat ultrasons amb una longitud d'ona de 111µm i una potència mitja de 280W durant 60 segons. La potència màxima registrada per l'aparell d'ultrasons en aquest procés ha estat de 320W.

Durant l'aplicació dels ultrasons el forn d'inducció ha estat treballant a 150V per mantenir la temperatura. La temperatura al final del procés ha estat de 665°C.

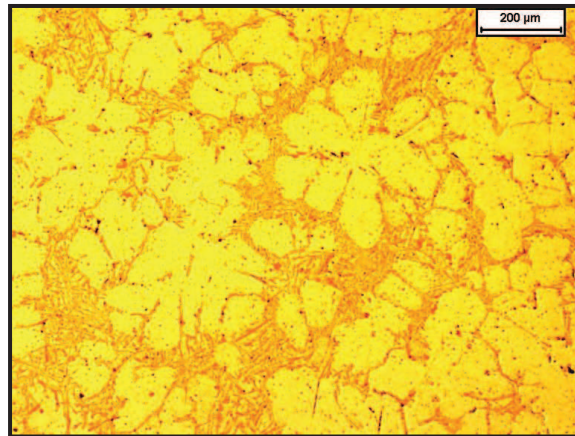


Figura 7.12: Microestructura Proveta M8.2.S

La micrografia pertanyent a la Proveta M8.2.S. mostra una estructura clarament dendrítica. La diferència que més s'aprecia, en comparació amb les micrografies vistes fins ara, és la grandària dels cristalls de Silici de la fase eutèctica. A l'escalfar l'aliatge a temperatures altes, com és el cas d'aquest assaig (700°C), aquest triga més a refredar-se. Un refredament lent, sense cap tremp en aigua per exemple, afavoreix el creixement dels cristalls.

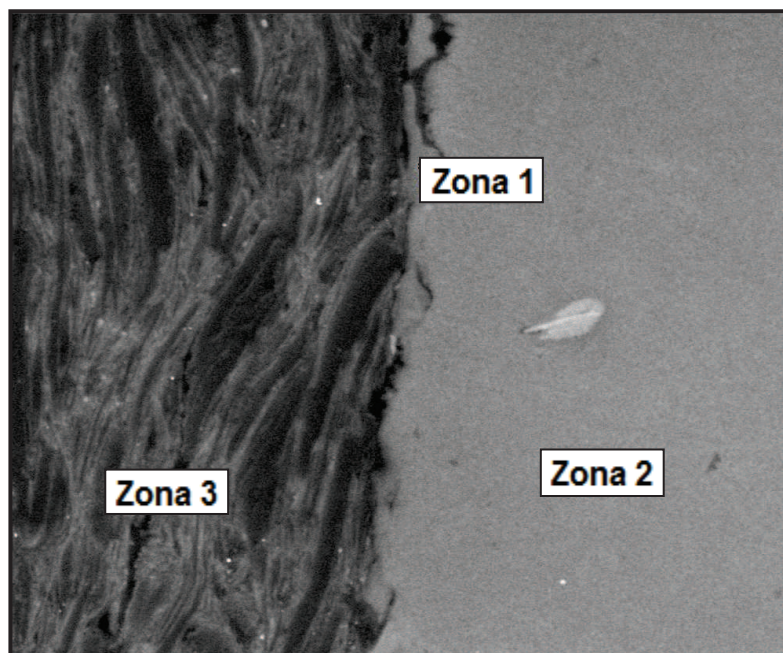


Figura 7.13: Micrografia SEM Proveta M8.3.S. Mina de grafit

La Figura 7.13. mostra una zona de límit de gra amb la mina de grafit. No s'observa cap mena de línia fosca que representi una porositat entre l'Alumini i el Carboni, fet que indica una bona adherència. En la següent taula es mostra com, en aquest cas, no hi ha cap mena d'oxidant en el límit de gra.

Es pot veure com els cristalls de Silici també s'adhereixen perfectament al grafit [Zona1].

Taula 7.5: Percentatges d'elements continguts en les zones d'estudi de la Proveta M8.3.S. Grafit

Zona	Elements (%)					
	Al	Si	C	O	Ca	Fe
1	16,03	83,97	-	-	-	-
2	63,97	28,83	-	-	-	-
3	3,21	6,71	60,45	3,57	2,83	3,23

Tot i que l'observació de la micrografia de la Proveta M8.3.S. s'ha pogut realitzar, la captura de la imatge i la lectura dels espectres no ha estat possible degut a que el microscopi electrònic es va avariar.

La impressió del Projecte es realitzarà sense la imatge. Si es repara el microscopi i es poden obtenir les captures, aquestes seran presentades en la lectura del projecte.

Figura 7.14: Micrografia SEM Proveta M8.3.S. Fibres de carboni

En les micrografies de les fibres de carboni de l'anterior Proveta (M7.3.S) s'han trobat moltes zones amb òxids creats per l'atac amb Alúmina. Aquesta conté Oxigen, el principal oxidant de l'alumini. Tot i que, a posteriori, l'aparició d'òxids ha estat un indicatiu de que existia adherència de les fibres amb l'Alumini. La proveta M8.3.S. ha estat tractada amb un altre reactiu de poliment perquè no s'oxidés ni l'Alumini ni el Silici. S'ha tractat amb pols de diamant (OP-U).

Després de polida, s'ha observat la proveta al microscopi electrònic i s'ha obtingut aquesta lectura d'elements que hi apareixen:

Taula 7.6: Percentatges d'elements continguts en les zones d'estudi de la Proveta M8.3.S. Fibres

Zona	Elements (%)					
	Al	Si	C	O	Ca	Fe
1						
2						
3						
4						

En la Figura 7.14. s'observa una homogeneïtat en la impregnació de les fibres de carboni amb l'Alumini. Si s'observa una fibra individualment, es pot veure com un percentatge superior al 90% de la superfície està en contacte amb l'Alumini. Encara apareix l'Oxigen en algunes zones ja que aquesta proveta havia estat tractada anteriorment, també, amb Alúmina.

7.4.5. Assaig M9

En aquest assaig les condicions de treball han estat de 350V, amb un escalfament fins a 600°C. A 600°C l'alumini es troba en un estat semisòlid.

S'han aplicat ultrasons amb una longitud d'ona de 111µm i una potència mitja de 250W durant 60 segons. La potència màxima registrada per l'aparell d'ultrasons en aquest procés ha estat de 290W.

El procediment d'aquest assaig s'ha realitzat de manera inversa. S'han aplicat ultrasons fins que la temperatura de l'aliatge d'alumini ha estat 595°C. Temperatura límit per extreure el sonotrode. Durant l'aplicació dels ultrasons el forn d'inducció també ha estat treballant a 150V per mantenir la temperatura.

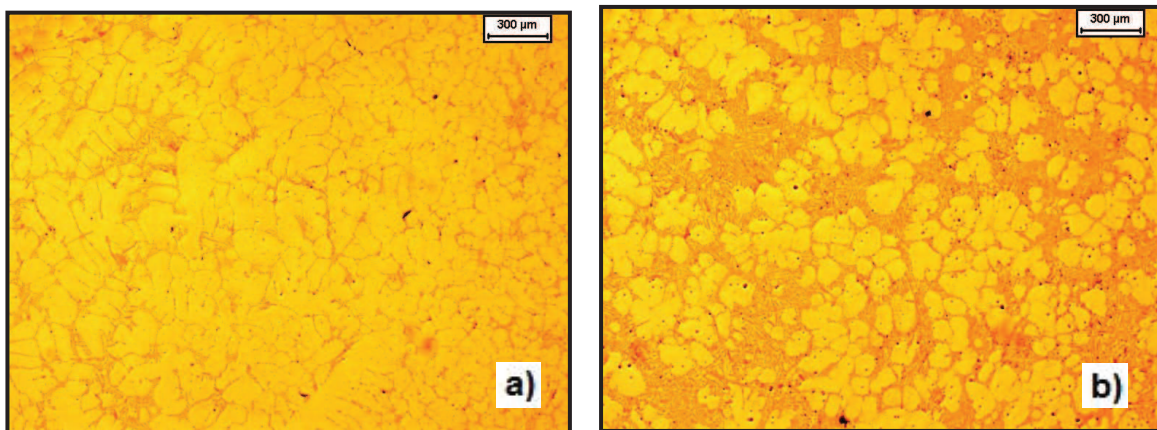


Figura 7.15: Microestructura Proveta M9.2.S: a) Perifèria de la proveta; b) Centre de la proveta

En la Proveta M9.2.S. s'han trobat dos tipus de microestructura en la mateixa proveta. La microestructura de la Figura 7.15. a) pertany a la zona perifèrica de la proveta, i la de la Figura 7.15. b) pertany al centre de la proveta, just sota del sonotrode.

En la zona pertanyent a la perifèria es pot observar un micro-constituent que rodeja la fase α molt més prim que en la zona central. Pel que fa a les dimensions de les dendrites, aquestes són molt més grans a la perifèria. En el centre es poden observar alguna petita zona amb fase α en forma globular. La diferència de microestructura en la mateixa proveta és deguda a la magnitud amb que les ones dels ultrasons arriben a aquestes zones. Les ones ultrasòniques es propaguen direccionalment en forma de con. Això fa que la major potència provocada per aquestes sigui just sota la banya del sonotrode. Com ja s'ha mencionat anteriorment amb una major potència d'ultrasons augmenten els espais interdendrítics, que és el que mostra la Figura 7.15 b). Tot i així, en una mostra tan petita no tindria que succeir l'aparició de dues microestructures però com l'alumini es troba en un estat semisòlid, les ones no es propaguen amb tanta facilitat com en l'estat líquid, fet que explica també la diferència estructural de la proveta.

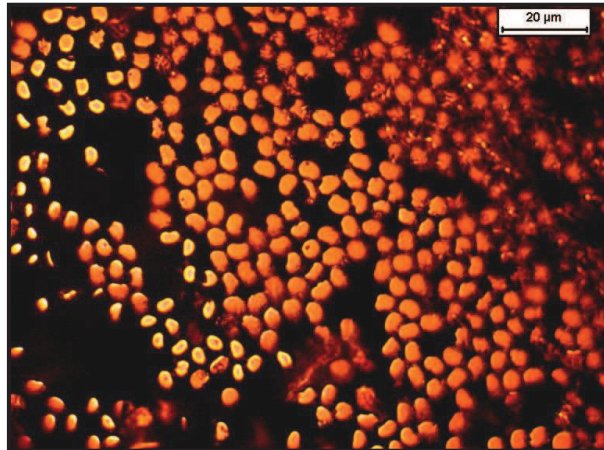


Figura 7.16: Micrografia Proveta M9.2.S. Fibres de carboni

La infiltració de les fibres no ha estat aconseguida en aquest assaig com es mostra en la Figura 7.16., en la que no s'ha apreciat ni la introducció de l'alumini entre el feix de fibres. Això es degut a l'estat semisòlid de l'aliatge amb el que s'ha treballat en aquest assaig. Encara que s'ha col·lat l'alumini líquid en el grisol, els ultrasons s'han aplicat quan la proveta estava a 600°C. La vibració originada pels ultrasons en el líquid és el factor prioritari que fa que l'alumini s'infiltri entre el feix de fibres, si l'alumini no es troba en aquest estat és molt difícil que es succeeixi la infiltració.

8. Anàlisi dels resultats

8.1. Influència de la temperatura de l'assaig

Durant la realització d'aquest projecte s'ha anat variant la temperatura dels assajos realitzats per observar la influència d'aquesta mateixa en l'aliatge i en la impregnació de les fibres de carboni i les mines de grafit. Les tres provetes analitzades en aquest apartat s'han realitzat amb la mateixa longitud d'ona, 111µm.

8.1.1. Influència en la microestructura de l'aliatge

Les mostres pertanyents a les micrografies de la Fig. 8.1. han estat sotmeses al mateix tractament d'ultrasons (Freqüència 20 kHz; Amplitud d'ona 111µm), però han estat escalfades a diferents temperatures. Les dues primeres dins l'interval líquid i la última en el semisòlid.

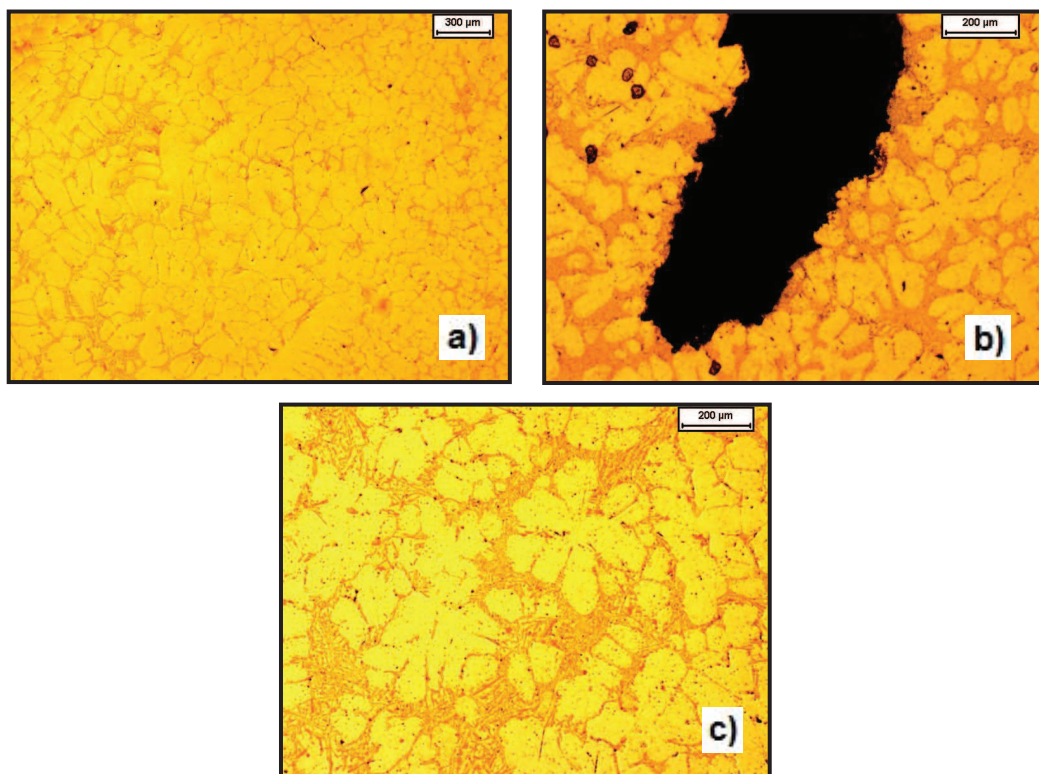


Figura 8.1: a) Provena M9.2.S (600°C); b) Provena M7.3.S (650°C); c) Provena M8.3.S (700°C)

Comparant les micrografies és pot veure que totes tres tenen una microestructura dendrítica. Ara bé, si que s'observa un augment en la mida de les dendrites i una forma dendrítica més definida a mesura que augmenta la temperatura. La diferència que s'observa més fàcilment és l'augment de l'espai interdendrític. En la Figura 8.1. a) l'espai interdendrític és molt fi, en canvi en la Figura 8.1. c), que mostra la

microestructura de la proveta escalfada fins a 700°C aquest ha augmentat considerablement de gruix i s'han format cristalls de Silici més allargats. El creixement dels cristalls de Silici està relacionat amb el temps que triga l'alumini a refredar-se. La Proveta M7 ha estat escalfada fins als 700°C i per tant ha trigat més que les altres dos a refredar-se.

No s'observa Silici primari en les zones sense mines de grafit o fibres de carboni.

8.1.2. Influència en la impregnació de l'aliatge d'alumini en les mines de grafit

Les mostres pertanyents a les micrografies de la Fig. 8.2. han estat sotmeses al mateix tractament d'ultrasons (Freqüència 20 kHz; Amplitud d'ona 111µm), però han estat escalfades a diferents temperatures.

Com s'ha vist en l'anàlisi individual de cada proveta, la impregnació de les mines de grafit ha estat bona en tots els assajos, exceptuant el del realitzat en estat semisòlid, del qual no s'han pogut obtenir mostres.

Observant les micrografies amb el microscopi òptic ja s'ha pogut comprovar que no apareix cap forat entre la superfície de l'Alumini i el Carboni. Tot i així, per corroborar-ho, s'han realitzat tres micrografies SEM de les provetes M7.3.S i de la M8.3.S., on després, s'han pogut obtenir dades de les composicions de les diferents zones de contacte [Figures 7.9. i 7.13.]. En aquestes s'ha comprovat que també existeix una total adherència entre els cristalls de Silici de la zona eutèctica i el Carboni. [Figura 8.2. b)]

S'ha observat que en els assajos a més temperatura han precipitat cristalls de Silici primari a la frontera de gra amb el Carboni [Figura 8.2. a)]. Fet que no succeïa als límits de gra que no estaven en contacte amb el Carboni, com mostra la Figura 8.1.

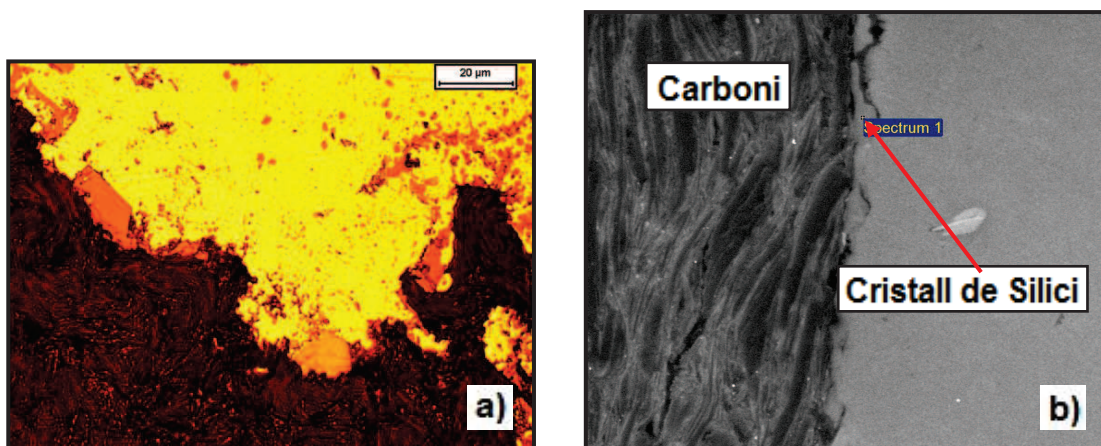
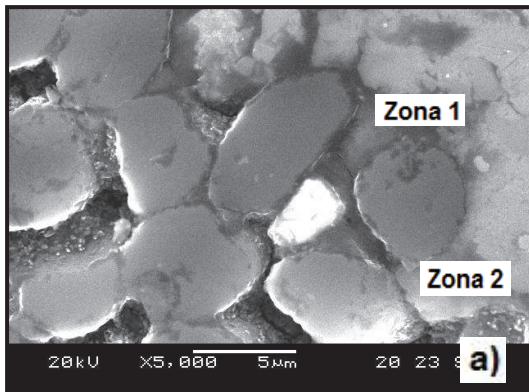


Figura 8.2: a) Proveta M7.3.S (650°C); b) Micrografia SEM Proveta M8.3.S (700°C)

8.1.3. Influència en la impregnació de l'aliatge d'alumini en les fibres de carboni

Les mostres pertanyents a les micrografies de la Fig. 8.2. han estat sotmeses al mateix tractament d'ultrasons (Freqüència 20 kHz; Amplitud d'ona 111µm), però han estat escalfades a diferents temperatures.



b)

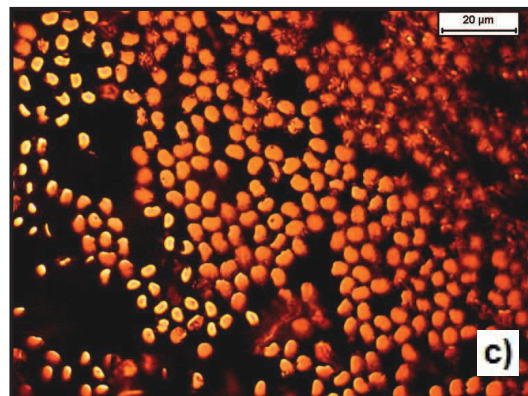


Figura 8.3: a) Proveta M7.3.S. (650°C); b) Proveta M8.3.S. (700°C); c) Proveta M9.2.S (600°C)

Com es pot observar en la Figura 8.3., la infiltració de les fibres només s'observa en els casos a) i b). En aquets dos assajos s'han aplicat els ultrasons a temperatures superiors a la línia líquidus de l'aliatge A356.0. En les dues s'observen zones de contacte entre l'aliatge i les fibres de carboni, tot i que en la Fig. 8.3. b) es pot veure una millor homogeneïtat en les zones de contacte, un major percentatge de la superfície de la fibra impregnada. En la Figura 8.3. a) s'observen, com s'ha comentat en la descripció individual de cada proveta, zones on hi apareix Oxigen juntament amb l'Alumini i el Silici. Aquest fet no depèn de la temperatura a la que s'ha sotmès la proveta, sinó a l'atac amb Alúmina realitzat per observar millor les micrografies.

8.2. Influència de l'amplitud i la potència d'ona dels ultrasons

Com s'ha fet amb la temperatura, en el procés experimental s'han anat variant l'amplitud d'ona amb la que treballava l'aparell d'ultrasons. El sonotrode ha captat la potència màxima dels ultrasons que es produïen en cadascun dels assajos. Aquesta ha variat segons les característiques del medi de propagació i el valor de l'amplitud d'ona que s'ha utilitzat.

L'augment de l'amplitud d'ona fa que augmenti la potència dels ultrasons, com també ho fa que l'aliatge es trobi a major temperatura i, conseqüentment, en un estat de menys densitat, on la propagació dels ultrasons és més eficaç.

8.2.1. Influència en la microestructura de l'aliatge

Amb l'anàlisi i comparació de les microestructures es pot veure com les tres mostres tenen una estructura similar pel que fa a la forma de les dendrites. Tot i que en les tres provetes la fase α es troba en forma dendrítica, s'observa una disminució de la mida relacionada amb l'augment de l'amplitud d'ona.

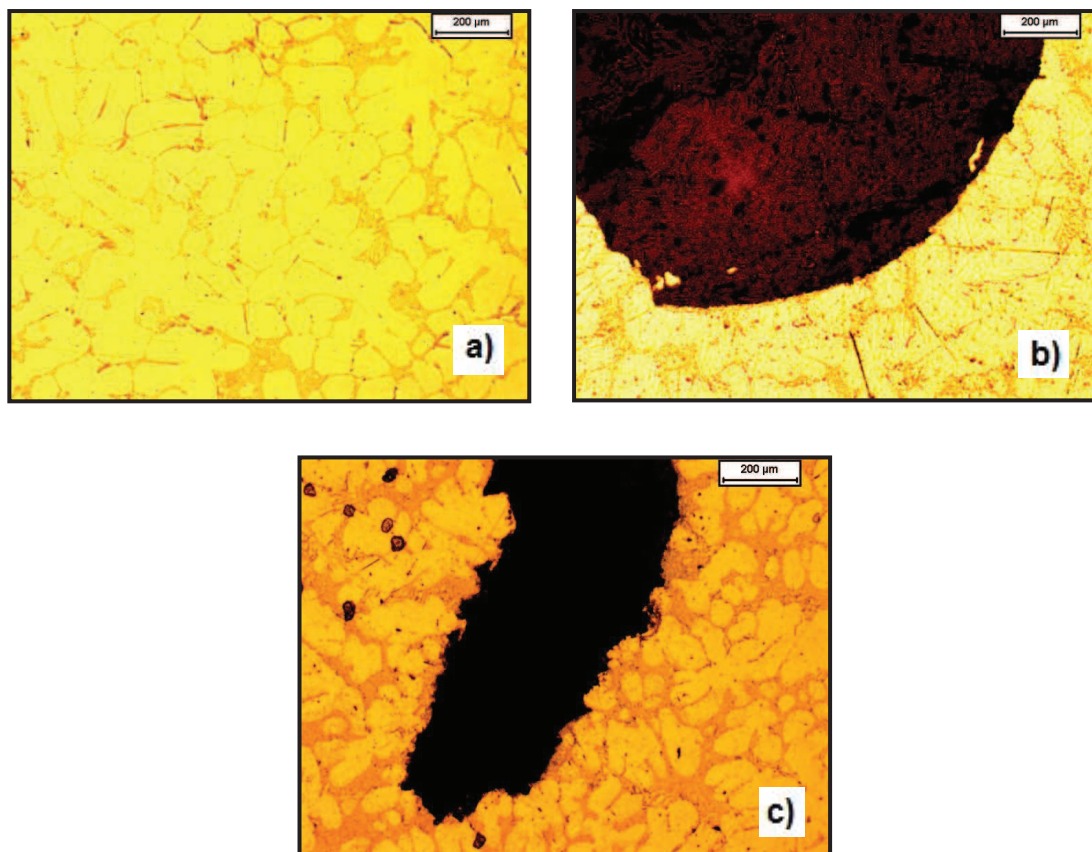


Figura 8.4: a) Proveta M6.3.S. (61µm); b) Proveta M5.3.S (78µm); c) Proveta M7.3.S (111µm)

En la [Fig. 8.4. a)] s'observen petites proporcions de micro-constituent eutèctic ocloses en la fase α i un espai interdendrític molt fi. A mesura que s'augmenta l'amplitud d'ona les zones de fase β ocloses en les dendrites desapareixen i, alhora, augmenta el gruix interdendrític.

8.2.2. Influència en la impregnació de l'aliatge d'alumini en les mines de grafit

La adherència de les mines de grafit amb l'aliatge d'alumini A356.0 s'ha aconseguit en tots els assajos realitzats del mètode amb aplicació d'ultrasons. Amb la mínima amplitud d'ona [Fig. 8.5. a)] que proporcionava el generador d'ultrasons fins la màxima [Fig. 8.5. c)] el resultat ha estat positiu.

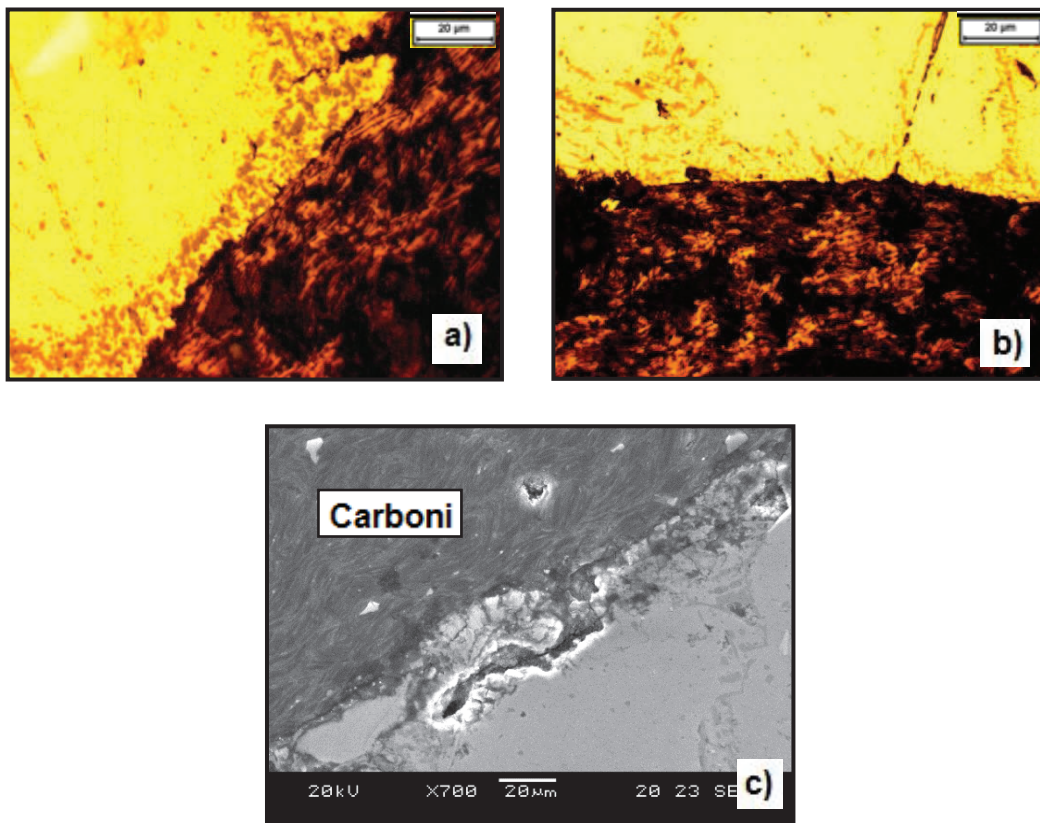


Figura 8.5: a) Proveta M6.3.S. (61µm); b) Proveta M5.3.S. (78µm); c) Proveta M7.3.S. (111µm)

8.2.3. Influència en la impregnació de l'aliatge d'alumini en les fibres de carboni

Com es pot observar en la Figura 8.6., treballant amb una amplitud d'ona de 78µm no s'ha aconseguit la infiltració de les fibres de carboni amb l'aliatge Alumini-Silici A356.0. Com es mencionava en els articles de la bibliografia [13] comentats en apartats anteriors, un factor que millorava la capacitat d'infiltració era la cavitació acústica que produïen els ultrasons en l'Alumini. Es documenta que aquesta, en aliatges amb un 2,4% en massa de Magnesi, s'origina a partir dels 250W de potència i 10 kHz de freqüència dels ultrasons.

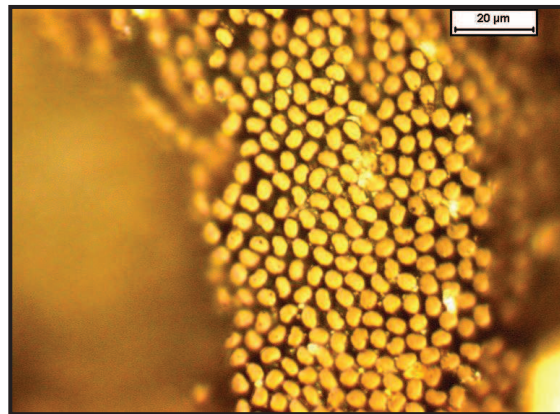


Figura 8.6: a) Proveta M5.3.S. (78µm)

L'aliatge amb el que s'ha treballat en aquest projecte no és el mateix que el dels articles mencionats, el A356.0 conté com a màxim un 0,45% en massa de Magnesi. Tot i així la potència a la que tindrà lloc la cavitació acústica serà molt semblant degut a que un augment del 2% en massa de Magnesi no és gaire significatiu. Podem concloure que en la Proveta M5.3.S. no s'ha originat una cavitació acústica ja que la potència mitja captada ha estat de 230W. Descartem també la infiltració de les fibres de carboni en la proveta M6.3.S. de la que no tenim cap micrografia on apareguin fibres degut a que encara s'ha treballat a menor amplitud d'ona (61µm).

Amb l'augment de l'amplitud d'ona s'ha comprovat que té lloc un augment en la potència mitja dels ultrasons. Els següents assajos s'han realitzat amb la màxima amplitud d'ona que generava l'aparell d'ultrasons per assegurar la cavitació acústica.

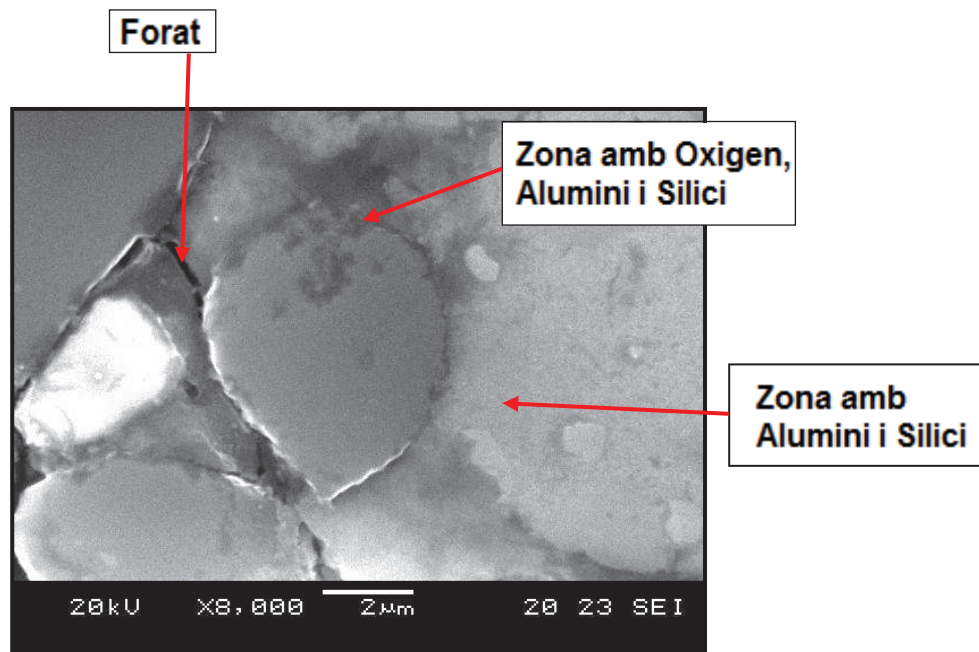


Figura 8.7: Proveta M7.3.S. SEM (111µm)

En la Figura 8.7. es pot observar com al voltant de la superfície de la fibra de carboni no hi han espais buits (com el que es mostra en la imatge "Forat"). Hi ha zones de contacte on el microscopi electrònic ha detectat només Alumini i Silici i altres zones on també ha detectat Oxigen. En les zones en que, a part de l'Alumini i el Silici, apareix Oxigen es pot predir que es tracta de zones amb òxids d'aquests dos elements. L'aparició d'òxids es un punt positiu en els futurs estudis sobre impregnació de fibres de carboni ja que aquest fet reflexa que hi ha contacte entre l'aliatge i les fibres.

8.3. Influència del temps d'aplicació dels ultrasons en els assajos

Pel que fa referència al temps d'aplicació dels ultrasons, no s'ha observat una relació clara amb la capacitat d'infiltració de les fibres de carboni, ja que no s'han pogut comparar assajos amb paràmetres en comú i la variable del temps d'aplicació d'aquests. Sí que es pot determinar que l'augment del temps d'aplicació dels ultrasons millora la homogeneïtzació de l'alumini fos i, com a conseqüència, la facilitat de propagació d'aquets mateixos en el medi.

9. Conclusions

L'objectiu que es pretenia assolir en aquest projecte era la adherència de les fibres de carboni en els aliatges Alumini-Silici mitjançant el mètode dels ultrasons. Aquest objectiu s'ha aconseguit en les provetes M7 i M8, treballant amb l'aliatge d'Alumini A356.0.

Tot i que s'ha observat impregnació en els dos casos, els millors resultats s'han vist en la Provena M8 on el percentatge d'impregnació, ràtio superfície impregnada/superfície total de la fibra de carboni, ha estat superior. Els dos assajos s'han realitzat amb les mateixes condicions pel que fa a la generació dels ultrasons: una freqüència de 20 kHz i una amplitud d'ona de 111µm. La capacitat d'infiltració de l'Alumini entre el feix de fibres de carboni millora a conseqüència de dos factors: la densitat de l'Alumini i la capacitat de propagació dels ultrasons en el medi. En la Provena M8 la densitat de l'Alumini era inferior per l'augment de la temperatura en l'assaig (700°C). Això ha provocat, al mateix temps, que milloressin les condicions de propagació dels ultrasons en el medi. Aquestes afirmacions es poden corroborar observant les potències màximes dels ultrasons que s'han registrat en els dos casos. En la Provena M7 on s'han aplicat els ultrasons a 650°C la potència màxima generada ha estat de 310W (potència mitja de 270W) i en la Provena M8, escalfada fins els 700°C, la màxima ha estat de 320W (potència mitja de 280W).

Així, podem concloure que els paràmetres òptims per treballar amb l'aliatge d'Alumini A356.0 mitjançant el mètode dels ultrasons són:

- Escalfament en el forn d'inducció a 350V fins a la temperatura d'aplicació dels ultrasons.
- Manteniment a 150V durant el procés d'aplicació dels ultrasons.
- Temperatura de l'aliatge a la que s'apliquen els ultrasons: 700°C
- Amplitud d'ona dels ultrasons: 111µm
- Freqüència dels ultrasons: 20kHz
- Potència mitja dels ultrasons: 280W
- Temps d'aplicació dels ultrasons: 60 segons

S'han pogut extreure altres conclusions a mesura que es desenvolupava el present projecte, com és l'efecte dels ultrasons en la microestructura de l'aliatge d'Alumini o la impregnació de mines de grafit, forma al·lotròpica del Carboni, en l'aliatge A356.0.

La microestructura de l'aliatge A356 consisteix en una fase α de forma dendrítica rodejada per un micro-constituent eutèctic. Aquesta es veu afectada per la temperatura i per l'aplicació d'ultrasons. Les dimensions de les dendrites disminueixen amb l'augment de l'amplitud d'ona i de la potència dels ultrasons, inversament ho fa el micro-constituent eutèctic que augmenta el seu gruix amb l'augment de l'amplitud d'ona.

Pel que fa referència a la impregnació de les mines de grafit en l'aliatge A356, aquesta ha estat bona en tots els assajos realitzats amb ultrasons, exceptuant l'assaig M9 realitzat en l'estat semisòlid.

10. Perspectives

Aquest projecte realitzat en el grup CDAL de la EPSEVG podria tenir una possible continuació: en el present projecte s'ha realitzat un estudi de l'efecte dels ultrasons en la adherència de l'aliatge A356.0. Els paràmetres estudiats han estat la temperatura de l'aliatge a l'hora d'aplicar els ultrasons, l'amplitud d'ona dels ultrasons, la potència dels ultrasons i el temps d'aplicació d'aquests. Es podria estudiar l'efecte d'altres paràmetres com son la variació de la freqüència dels ultrasons o realitzar els assajos amb un altre aliatge. També, un cop millorat el procediment experimental, es podrien realitzar proves d'esforços amb l'Alumini reforçat amb fibres de carboni.

11. Pressupost

Preparació del Projecte	Despeses €/hora	Hores	Total (€)
Documentació	10	40	400
Formació prèvia	10	15	150
			Total
			550

Assajos realitzats	Despeses màquina €/hora	Despeses enginyer €/hora	Hores	Total (€)
Engegat del forn d'inducció	-	10	20	200
Estudi dels paràmetres d'inducció	-	10	15	150
Estudi dels paràmetres d'ultrasons	-	10	15	150
Escalfament per inducció	90	10	15	240
Homogeneïtzació per ultrasons	60	10	15	210
				Total
				950

Preparació metal·logràfica	Despeses màquina €/hora	Despeses enginyer €/hora	Hores	Total (€)
Tallat de provetes	40	10	20	1.000
Desbast i polit	40	10	20	1.000
Atac metal·logràfic	40	10	20	1.000
				Total
				3.000

Material utilitzat	Despeses €/unitat	Unitats	Total (€)
A356.0	40	0,5 kg	20
Fibra de Carboni	200	0,05m	10
Alúmina (Al ₂ O ₃)	5	2	10
Resina per a examinació amb SEM	20	1	20
Discs de polit	5	5	25
			Total
			85

Edició del projecte	Despeses €/hora	Hores	Total (€)
Discussió dels resultats	10	20	200
Supervisió del projecte	10	20	200
Redacció del PFC	10	120	1.200
Redacció de l'article	10	8	80
Edició del pòster	10	4	40
Impressió de la memòria	-	-	60
Impressió pòster i article	-	-	20
			Total
			1.800

Total sense IVA (€)	6.385 €
IVA (%)	18%
TOTAL (€)	7.534 €

12. Gestió ambiental

Aquest projecte està directament relacionat amb la cura del medi ambient. L'alumini és un metall altament reciclable i no contaminant, a més de ser el material metàl·lic més abundant de l'escorça terrestre.

Aquest material s'ha convertit en un dels més utilitzats en el món de la indústria aeronàutica i automobilística, sobretot gràcies a la seva lleugeresa que ha fet que moltes peces deixin de fer-se d'acers i altres materials més pesants. Aconseguint alhora una reducció de consum de carburant, una reducció econòmica per als usuaris i empreses, i una disminució de gasos que provoquen l'efecte hivernacle.

L'escalfament per inducció, ofereix una millora en la línia de producció. En tractar-se d'equips petits, poden col·locar-se al costat de la línia o formant part de la mateixa, disminuint així el temps del procés. A més, proporciona una velocitat d'escalfament més alta al davant a altres forns tradicionals.

En l'elaboració del projecte sempre s'ha intentat minimitzar al màxim el material utilitzat. Per exemple, al preparar les provetes es van tallar a una mida mínima requerida per no utilitzar més A357 del necessari, o utilitzant gresols de mides inferiors als normals. En el procés de preparació de les mostres metal·logràfiques s'ha treballat sempre de manera molt eficient, utilitzant la quantitat justa d'abrasius, aigua i alúmina, utilitzant la polidora amb la màxima quantitat de peces alhora i el temps adequat. En aquests processos s'han creat diversos residus com ara els abrasius i el encenalls del mecanitzat, els abrasius són reciclats segons la normativa ISO 14000 i els encenalls són portats per una empresa externa que s'encarrega del seu reciclatge futur.

Durant l'elaboració del projecte no s'ha imprès pràcticament cap document, ja que en tot moment s'ha treballat en documents virtuals via correu electrònic.

Per tant el impacte ambiental que ha tingut el projecte ha sigut mínim en tots els aspectes.

13. Agraïments

Aquest apartat va dirigit a totes aquelles persones que han cregut en mi i m'han recolzat al llarg dels estudis universitaris.

En primer lloc, m'agradaria agrair el interès i recolzament mostrat a tots els membres del Centre de Disseny d'Aliatges Lleuger i Tractaments de Superfícies i al propi centre per oferir-me la possibilitat de realitzar un projecte d'aquest tipus. Al Dr. Sergi Menargues i al senyor Manel Campillo pel temps i per l'ajuda que m'han prestat alhora d'ensenyar-me el funcionament del material de laboratori, al Dr. Josep A. Picas per ajudar-me amb l'anàlisi fet en el microscopi electrònic i al Dr. Antoni Forn, en especial, per ser el tutor del meu projecte de final de carrera i per les hores i paciència que ha tingut amb mi durant tot el desenvolupament d'aquest projecte.

En últim lloc, però sense restar importància, agrair als meus amics la capacitat i les empentes que m'han donat al llarg d'aquests quatre e intensos anys de carrera.

A tothom, i cadascun d'ells: **GRÀCIES.**

14. Bibliografia

- [1] W. D. Callister, Jr. "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales". Ed. Reverté, S.A. (1995).
- [2] H.F.Gasca, "Diseño de una tecnología de obtención de lingotes de Rheocasting" PFC (2010)
- [3] Coca Rebollero, R., Rosique Jiménez, J. Ciencia de materiales, Ediciones Pirámide, Madrid, (1987).
- [4] Davis J.R., "Aluminium and aluminium alloys". ASM International Handbook Committee (1993).
- [5] Altenpohl D.G., Technology, Applications, and Environment. Aluminium Association, Minerals, Metals & Material Society, 6th Edition, (1998).
- [6] A. Forn, M. Baile, J.A. Picas y E. Martín. *Propiedades mecánicas y análisis fractográfico de Componentes AlSiMg conformados en estado semisólido*. Anales de la Mecánica de la Fractura Vol. 22 (2005). CDAL y UPC.(2005).
- [7] Muñoz Guerrero, José Antonio. Propiedades mecánicas de componentes de aleación A356 producidos por el procedimiento industrial sub líquido casting (SLC). Proyecto Final de Carrera. (2008)
- [8] <http://es.ambrell.com/aboutinduction.php>
- [9] David Rodriguez, David Ribas, Andres Lara. PFC: Calentamiento por inducción (Universidad de Terrasa)
- [10] Forn A., Baile M., Picas J.A. y Martín E. "*Propiedades mecánicas y análisis fractográfico de componentes AlSiMg conformado en Estado Semisólido*". <http://www.gef.es/Congresos/22/PDF/32.pdf> (2005)
- [11] Kaufmann, H., Uggowitzer, J. *Metallurgy and processing of high-integrity light metal pressure castings*. Shiele & Shön., 2007.
- [12] Matsunaga T. Matsuda K., Hatayama T., Shinozaki K., Yoshida M. *Fabrication of continous carbon fiber-reinforced aluminum-magnesium alloy composite wires using ultrasonic infiltration method*. 2007.
- [13] Matsunaga T. Matsuda K., Hatayama T., Shinozaki K., Yoshida M. *Effect of acoustic cavitation on ease of infiltration of molten aluminum alloys into carbon fiber bundles using ultrasonic infiltration method*. 2006.

15. Índex de figures i taules

Figures

Figura 4.1: Dispositiu d'infiltració de les fibres.....	10
Figura 4.2: Influència de la potència dels ultrasons.....	12
Figura 4.3: Influència del diàmetre del forat del sonotrode.....	13
Figura 4.4: Influència de la velocitat de fabricació amb relació al contingut en Mg.....	13
Figura 4.5: Seccions transversals CF/Al.....	14
Figura 4.6: Espectre de la pressió del so.....	15
Figura 4.7: Micrografia obtinguda de les fibres de carboni.....	16
Figura 4.8: Relació entre el ràtio d'infiltració i la màxima intensitat de freqüència.....	16
Figura 4.9: Espectres de la pressió del so en els aliatges Al-Mg.....	17
Figura 4.10: Influència del contingut de Mg.....	17
Figura 5.1: Diagrama de fase Al-Si.....	19
Figura 5.2: Filament de carboni de 6 micròmetres.....	20
Figura 5.3: Forn d'inducció.....	21
Figura 5.4: Aparell d'ultrasons.....	22
Figura 6.1: Mecanisme per mantenir rectes les mines de grafit.....	23
Figura 6.2: Monitor Central del forn d'inducció.....	24
Figura 6.3: Selecció de paràmetres del forn d'inducció.....	25
Figura 6.4: Col·locació de l'aliatge per a l'escalfament del mateix.....	27
Figura 6.5: Exemple de proveta.....	27
Figura 6.6: Seccions de talls de la proveta.....	28
Figura 6.7: Proveta cilíndrica mitjançant resina.....	28
Figura 7.1: Velocitat d'escalfament a 350V.....	31
Figura 7.2: Micrografia Proveta M4 10X; b) Visualització de a) a 20X.....	34
Figura 7.3: Micrografies Proveta M5.3.S. Mines de grafit: a) 5X; b) 10X; c) 10X; d) 50X.....	35
Figura 7.4: Micrografies proveta M5.3.S. Fibres de Carboni: a) 50X; b) Mateixa micrografia amb enfocament inclinat.....	36
Figura 7.5: Micrografies Proveta M6.3.S. Mines de grafit: a) Microestructura de la proveta; b) Zona de contacte amb el grafit.....	37
Figura 7.6: Microestructura Proveta M7.3.S.....	38
Figura 7.7: Micrografies Proveta M7.3.S Mines de grafit: a) Zona 1; b) Zona 2.....	39
Figura 7.8: Micrografia SEM Proveta M7.3.S. Mines de grafit.....	39
Figura 7.9: Micrografia SEM Proveta M7.3.S. Mines de grafit.....	40

Figura 7.10: Micrografies Proveta M7.3.S. Fibres de Carboni.....	41
Figura 7.11: Micrografia Proveta SEM M7.3.S. Fibres de Carboni.....	42
Figura 7.12: Microestructura Proveta M8.2.S.....	43
Figura 7.13: Micrografia SEM Proveta M8.3.S. Mina de grafit.....	44
Figura 7.14: Micrografia SEM Proveta M8.3.S. Fibres de carboni.....	45
Figura 7.15: Microestructura Proveta M9.2.S: a) Perifèria de la proveta; b) Centre de la proveta.....	46
Figura 7.16: Micrografia Proveta M9.2.S. Fibres de carboni.....	47
Figura 8.1: a) Proveta M9.2.S (600°C); b) Proveta M7.3.S (650°C); c) Proveta M8.3.S (700°C).....	48
Figura 8.2: a) Proveta M7.3.S (650°C); b) Micrografia SEM Proveta M8.3.S (700°C).....	49
Figura 8.3: a) Proveta M7.3.S. (650°C); b) Proveta M8.3.S. (700°C); c) Proveta M9.2.S (600°C).....	50
Figura 8.4: a) Proveta M6.3.S. (61µm); b) Proveta M5.3.S (78µm); c) Proveta M7.3.S (111µm).....	51
Figura 8.5: a) Proveta M6.3.S. (61µm); b) Proveta M5.3.S. (78µm); c) Proveta M7.3.S. (111µm).....	52
Figura 8.6: a) Proveta M5.3.S. (78µm).....	53
Figura 8.7: Proveta M7.3.S. SEM (111µm).....	54

Taules

Taula 4.1: Condicions de fabricació [12].....	11
Taula 4.2: Composició química dels aliatges utilitzats [12].....	12
Taula 5.2: Propietats de l'aliatge d'alumini A356 i A357 [4].....	19
Taula 5.3: Forns d'inducció.....	21
Taula 5.4: Relació Nivell – Amplitud d'ona del sonotrode.....	22
Taula 6.1: Procés d'escalfament de l'aliatge d'alumini en el primer grisol.....	26
Taula 6.2: Procés de desbast de les provetes.....	29
Taula 6.3: Procés de polida de les provetes.....	29
Taula 7.1: Classificació assajos.....	32
Taula 7.2: Procés a que es sotmet el feix de fibres (Mètode 1).....	33
Taula 7.3: Percentatges d'elements continguts en les zones de la Proveta M7.3.S Grafit.....	40
Taula 7.4: Percentatges d'elements continguts en les zones de la Proveta M7.3.S. Fibres.....	42
Taula 7.5: Percentatges d'elements continguts en les zones de la Proveta M8.3.S. Grafit.....	44
Taula 7.6: Percentatges d'elements continguts en les zones de la Proveta M8.3.S. Fibres.....	45

